

Impact du décortiquage et des traitements thermiques du soja sur la valeur nutritionnelle des tourteaux partiellement déshuilés chez le porcelet

Veronika HALAS (1), Eric ROYER (2), Patrick CARRE (3), Paul BIKKER (4), Alain QUINSAC (3), Knud Erik BACH KNUDSEN (5)

(1) Kaposvár University, Kaposvár, Hongrie,

(2) IFIP-Institut du porc, Toulouse, France,

(3) Olead - Terres Inovia, Pessac, France,

(4) Wageningen University & Research, Wageningen, Pays-Bas,

(5) Aarhus University, Tjele, Danemark.

halas.veronika@ke.hu

Avec la collaboration de János TOSSENBERGER (1), Gergő SUDAR (1), Jean-Philippe LOISON (3), Piet van WIKSELAAR (4)

Impact du décortiquage et des traitements thermiques du soja sur la valeur nutritionnelle des tourteaux partiellement déshuilés chez le porcelet

Des graines de soja cultivées en Europe ont été broyées, puis décortiquées (D) ou non (W), puis extrudées par mono vis à 140°C à environ 100 kg/h (EP) ou bien cuites à 150°C pendant 60 minutes après floconnage (FCP), et enfin pressées. L'extrusion permet d'abaisser la teneur en huile résiduelle dans les tourteaux, alors que le décortiquage accroît la teneur en protéine. Les activités anti-trypsiques (TI) sont, respectivement, de 2,6, 3,5, 3,6 et 7,6 UIT/mg pour les tourteaux EP-W, EP-D, FCP-W et FCP-D. La température inférieure en sortie du sécheur du lot FCP-D (90 vs 97°C) explique probablement une moindre inactivation des TI, ce que confirme l'hydrolyse *in vitro* à base de trypsine, chymotrypsine et peptidase (méthode pH-stat). Les valeurs nutritionnelles des quatre tourteaux ont été comparées à celle d'un tourteau extrait au solvant lors d'un essai zootechnique d'une durée de 28 jours suivi par une collecte en cages de digestibilité pendant 5 jours consécutifs. Pour ces deux essais, 70 porcelets mâles castrés âgés de 5 semaines ont été utilisés. La digestibilité iléale apparente et standardisée a été déterminée par collecte post-mortem des digesta à la fin de l'iléon. Les performances et la rétention azotée obtenues avec trois des tourteaux (EP-D, EP-W et FCP-W) sont équivalentes à celles du tourteau témoin, mais avec des digestibilités iléales apparente et standardisée des acides aminés numériquement supérieures à celle du témoin. Les performances dégradées et la digestibilité inférieure des acides aminés obtenues avec le tourteau FCP-D soulignent l'importance d'une bonne maîtrise de l'activité antitrypsique. Grâce à leur excellente valeur biologique, de tels tourteaux produits à partir de soja local non OGM pourraient avoir un intérêt nutritionnel et économique en Europe.

Influence of dehulling and thermal treatment of soybeans on nutritive value of partly defatted soy meals for piglets

European grown soy beans were ground, then dehulled (D) or kept whole (W), then extruded using a single screw extruder at 140 °C at about 100 kg/h (EP) or cooked at 150 °C during 60 minutes after flaking (FCP), and finally pressed. Extrusion allowed a lower residual oil content in the soybean meal (SBM), whereas dehulling resulted in a higher content of the protein. The trypsin inhibitor (TI) values were 2.6, 3.5, 3.6 and 7.6 TIU /mg, for EP-W, EP-D, FCP-W and FCP-D SBM, respectively. The lower temperature at the dryer exit for the FCP-D batch (90 vs 97 °C) probably explained a lower TI inactivation, which was confirmed by the *in vitro* hydrolysis using trypsin, chymotrypsin and peptidase (pH-Stat method). The nutritive values of the four meals were compared to a commercially available solvent extracted SBM in a 28-day performance trial using a total of 70 5-week-old barrow piglets, followed by a 5-day N balance study in metabolic cages with the same animals. Apparent (DIA) and standardized (DIS) ileal digestibility were determined by ileal chyme collection post-mortem. Diets contained the different SBMs as sole protein source. Three of the diets (EP-D, EP-W, and FCP-W) resulted in similar performance and N retention compared to the control SBM, and had higher apparent and standardized ileal digestibility of amino acids than this control diet. Lower piglet performance and amino acids digestibility for the FCP-D diet highlight the importance of a low residual TI activity in SBM. Thanks to their excellent biological value, such meals produced from local and non-GMO soybeans could be of nutritional and economic interest in Europe.

INTRODUCTION

Pour la campagne 2017/18, le tourteau de soja représentait 46% des sources de protéines utilisées en alimentation animale par l'Union Européenne, dont l'autosuffisance pour la couverture des besoins en tourteau de soja est seulement de 2% (Commission Européenne, 2019). Après une période de fort déclin, l'augmentation récente de la production européenne de soja non génétiquement modifié et sa transformation dans des usines de taille moyenne à vocation locale pourrait contribuer à réduire la dépendance vis-à-vis des importations (De Visser *et al.*, 2014 ; Martin, 2015).

Le traitement classique des graines de soja comprend l'aplatissage, le déshuilage à l'hexane, le traitement à l'éthanol pour éliminer les glucides solubles et le séchage à l'éthanol. L'hexane est un composé organique volatil, inflammable, non renouvelable dont l'emploi est réglementé. De plus, l'extraction par solvant exige un lourd investissement et un approvisionnement constant de soja pour fonctionner en continu (Quinsac *et al.*, 2012). L'extraction dite expeller du soja est une alternative à l'utilisation de l'hexane, dont les conditions de traitement et les valeurs nutritives du produit fini ont fait l'objet de plusieurs études antérieures. Cependant, les réponses des porcs à ces tourteaux sont contrastées et suggèrent des valeurs nutritionnelles différentes selon l'origine des graines et le procédé utilisé (Karr-Lilienthal *et al.*, 2006 ; Opapeju *et al.*, 2006). L'objectif de l'étude est de comparer l'impact de la combinaison du décorticage et de la cuisson par extrusion ou cuisson sur les valeurs nutritionnelles pour le porcelet de tourteaux partiellement déshuilés obtenus à partir de graines européennes.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Production des tourteaux

Le soja (*Var.* Eudor, Euralis, Pau, France) utilisé dans cette étude a été cultivé près de Toulouse en 2015. Environ 4 T de graines ont été triturées par OLEAD (Pessac, France), selon les méthodes déjà détaillées par Quinsac *et al.* (2012). Brièvement, les graines de soja ont été broyées à l'aide d'un broyeur à cylindres (Damman-Croes, Roulers, Belgique), puis décortiquées (D) ou non (W) avec un séparateur (D50, Ets Denis, Brou, France). Les deux produits ont été soit extrudés par extrusion monovis (FEX1, France Extrusion) à 140°C à environ 100 kg/h (EP), soit cuits (cuiseur horizontal avec vapeur, Olexa, Arras, F) à 150°C pendant 60 minutes après floconnage avec cylindres lisses contre-rotatifs (FCP). Toutes les graines ont ensuite été pressées (MBU 75, Olexa, Arras, France) pour en extraire l'huile.

1.2. Animaux, régimes et schéma expérimental

Un total de 70 porcelets mâles castrés DanBred, sevrés à 28 jours d'âge, ont été utilisés à l'Université de Kaposvár (Hongrie) après 4 jours d'adaptation, lors d'un essai de performance de 28 jours en loges individuelles, suivi d'une mesure de la rétention azotée pendant 5 jours en cages métaboliques. Les porcs ont ensuite été abattus pour la collecte post-mortem des digesta dans l'iléon. Les porcelets sont affectés à l'un des sept traitements expérimentaux, à raison de cinq porcelets par traitement lors de deux répétitions.

Cinq aliments expérimentaux ont été préparés à base d'amidon de maïs, de sucre, d'huile de tournesol, de minéraux et vitamines, et de l'un des quatre tourteaux expérimentaux EP-W, EP-D, FCP-W et FCP-D, ou d'un tourteau de soja extrait au solvant obtenu sur le marché (CL). Dans le sixième aliment (CAS), la caséine est utilisée comme source protéique de référence en raison de sa digestion quasi complète. Le septième aliment, utilisé pour déterminer les pertes endogènes d'azote et d'acides aminés, est un régime protéoprive (PP) auquel une source de fibres est ajoutée (Arbocel®). Du dioxyde de titane (TiO₂) est inclus à hauteur de 0,5 % dans les aliments en tant que marqueur indigestible (Tableau 1). Les différents tourteaux de soja et la caséine sont la seule source de protéines mais avec une supplémentation en méthionine de chaque aliment expérimental, afin d'assurer une évaluation réaliste des aliments. Aussi, à l'exception du régime protéoprive, les régimes sont iso-protéiques (180 g matières azotées totales (MAT)/kg d'aliment), iso-énergétiques (10,9 MJ d'énergie nette (EN)/kg) mais ne sont pas iso-acides aminés (Tableau 2). Pendant la période d'adaptation, l'aliment distribué est celui donné sous la mère. Puis, chaque animal des groupes CL, EP-W, EP-D, FCP-W, FCP-D et CAS reçoit le même aliment pendant la totalité de l'étude, de façon *ad libitum* au cours de l'essai de performance puis à 90 % de l'*ad libitum* lors des 5 jours de collecte, alors que les porcs du groupe protéoprive reçoivent d'abord l'aliment CL puis l'aliment PP lors des 5 derniers jours.

1.3. Mesures et prélèvements des fèces et digesta

Les animaux sont pesés au début de l'essai puis toutes les semaines, ainsi qu'au début et à la fin de la période de collecte. La consommation d'aliment est calculée par semaine à partir de la différence entre les quantités d'aliment distribuées et non consommées.

Lors de la période de bilan, les fèces sont collectées deux fois par jour (après les distributions du matin et de l'après-midi), pesées et stockées à -18°C. A la fin de l'essai, les fèces sont homogénéisées, soigneusement séchées (65°C) et broyées. L'urine est collectée en continu dans un bac avec de l'acide sulfurique à 50 %, et le volume et le pH sont mesurés chaque matin. Après homogénéisation de la collecte quotidienne, un échantillon de 15 % est stocké à -18°C. À la fin de l'essai, les échantillons d'urine sont décongelés, homogénéisés et filtrés.

La digestibilité iléale post-mortem des protéines et des acides aminés est déterminée au terme de l'essai de rétention. Le lendemain, les porcelets sont euthanasiés 4 heures après le repas du matin, de quantité identique à celui de la veille. L'intestin est alors prélevé. Le contenu de l'iléon à partir de 10-15 cm avant la jonction iléo-caeco-colique est rincé à l'eau distillée, puis déshydraté (65°C).

1.4. Analyses

1.4.1. Graines et tourteaux de soja

La composition chimique des graines crues et des tourteaux partiellement déshuilés a été analysée au laboratoire Terres Innovia (Ardon, France), celle du tourteau CL à l'Université de Kaposvár. Les teneurs en inhibiteurs de la trypsine [1 UIT/mg = 1,9 mg/g d'activité inhibitrice de la trypsine (AIT)] ont été analysées par le laboratoire InVivo Labs (Vannes, France) selon la méthode AOCS Ba 12-75 SN. La teneur en lysine réactive OMIU (Hulshof *et al.*, 2016) et le taux d'hydrolyse *in vitro* à base

Tableau 1 – Composition chimique des graines crues et des tourteaux de soja¹

| En % du brut sauf mention | Graines brutes | EP-W | EP-D | FCP-W | FCP-D | CL |
|--|----------------|-------|--------|-------|-------|------|
| Matière sèche (MS) | 86,6 | 94,2 | 93,85 | 91,3 | 92,3 | 88,5 |
| Matières grasses | 17,8 | 4,6 | 4,8 | 7,8 | 5,9 | 1,4 |
| Matières azotées totales | 38,4 | 50,1 | 52,3 | 46,6 | 50,5 | 44,9 |
| Solubilité protéines KOH (%) | 95,0 | 70,2 | 75,9 | 82,0 | 88,8 | |
| Cellulose brute | 4,8 | 5,5 | 2,9 | 5,1 | 3,2 | 3,7 |
| Inhibiteurs de trypsine (UIT/mg) | 25 | 2,6 | 3,5 | 3,6 | 7,6 | 2,9 |
| PNA solubles (% MS) ² | | 3,9 | 3,8 | 4,4 | 2,2 | |
| PNA insolubles (% MS) ² | | 17,2 | 12,6 | 16,9 | 15,3 | |
| Lysine, g/100 g acides aminés | 6,38 | 6,35 | 6,38 | 6,45 | 6,44 | 5,90 |
| Lysine réactive/totale, % | 97,9 | 105,9 | 102,6 | 100,7 | 102,6 | |
| Constante (k) d'hydrolyse (×10 ⁻⁶) | 46,1 | 115,9 | 82,0 | 87,1 | 80,0 | |
| Degré maximal d'hydrolyse, % | 12,38 | 19,90 | 21,52d | 20,29 | 19,10 | |

¹ EP-W = extrusion pression de graines entières; EP-D = extrusion pression de graines décortiquées; FCP-W = floconnage cuisson pression de graines entières; FCP-D = floconnage cuisson pression de graines décortiquées; CL = Contrôle obtenu par extraction hexane. ² PNA = polysaccharides non amyliacés.

Tableau 2 – Composition centésimale et nutritionnelle des aliments expérimentaux¹

| | CL | EP-W | EP-D | FCP-W | FCP-D | CAS | PP |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Composition centésimale, g/kg brut | | | | | | | |
| Amidon de maïs | 482,7 | 533,7 | 555,2 | 508,9 | 542,6 | 624,1 | 805,9 |
| Sucre | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 |
| Tourteau de soja | 378,0 | 358,0 | 343,0 | 386,6 | 355,0 | 0 | 0 |
| Caséine | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 214,3 | 0 |
| Arbocel® | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50,0 | 50,0 |
| Huile de tournesol | 45,0 | 15,0 | 8,0 | 12,0 | 9,0 | 15,0 | 42,0 |
| DL-Méthionine | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | |
| Minéraux et vitamines ² | 43,3 | 42,3 | 42,8 | 41,5 | 42,4 | 46,8 | 52,1 |
| Composition nutritionnelle, g/kg brut sauf mention | | | | | | | |
| Matière sèche ⁴ | 912 | 919 | 918 | 916 | 916 | 927 | |
| Matières azotées totales ⁴ | 176 | 173 | 166 | 183,5 | 174 | 171,5 | 5,1 |
| Matières grasses ⁴ | 50,0 | 32,5 | 26,0 | 44,0 | 36,5 | 14,5 | 49,0 |
| Cellulose brute ⁴ | 15,5 | 18,5 | 9,0 | 21,5 | 12,0 | 29,5 | 32,0 |
| Cendres brutes ⁴ | 54,5 | 51,5 | 49,5 | 52,5 | 50,5 | 47,0 | 42,5 |
| Energie nette ³ , MJ/kg | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 |
| Lysine totale ³ | 1,04 | 1,00 | 0,96 | 1,09 | 1,03 | 1,20 | nd |
| Calcium ⁴ | 7,3 | 6,7 | 6,3 | 6,7 | 6,6 | 7,4 | 7,4 |
| Phosphore total ⁴ | 5,8 | 5,5 | 5,4 | 5,6 | 5,4 | 6,1 | 5,7 |

¹ Voir Tableau 1; CAS = caséine, PP = régime protéoprive. ² phosphate monocalcique, carbonate de calcium, sel, premix d'oligo-éléments et vitamines, dioxyde de titane (5 g/kg). ³ Valeurs calculées. ⁴ Valeurs analytiques. nd : non déterminé.

de trypsine, chymotrypsine et peptidase (méthode pH-stat; Salazar-Villanea *et al.*, 2016) ont été déterminés par Wageningen University & Research (Pays-Bas).

1.4.2. Fèces et digesta

La composition chimique des régimes alimentaires et des échantillons de digesta (matière sèche, matières azotées totales, matières grasses, cellulose brute, cendres brutes, Ca, P), ainsi que le dosage des acides aminés et du TiO₂ ont été déterminés conformément aux recommandations de l'AOAC (1989) à l'Université de Kaposvár. La teneur en matière sèche et en protéines brutes des matières fécales et de l'urine y a également été mesurée.

1.5. Calculs et analyses statistiques

La rétention relative de l'azote (N_{rétention} en % de l'apport) est déterminée comme suit :

$$N_{rétention} = (N_{ingéré} - N_{fèces} - N_{urine}) * 100 / N_{ingéré}$$

Le flux iléal basal d'acides aminés endogènes (IAA_{endo}, g/j) mesuré chez les porcelets du régime PP, ainsi que les digestibilités iléales apparente (DIA, %) et standardisée (DIS, %) de chaque acide aminé sont déterminées selon la méthode du marqueur indigestible (Stein *et al.*, 2007) comme suit :

$$IAA_{endo} = AA_{digesta} \times (M_{aliment} / M_{digesta})$$

$$DIA = (1 - AA_{digesta} / M_{digesta} \times M_{aliment} / AA_{aliment}) \times 100$$

$$DIS = DIA + (IAA_{endo} / AA_{aliment}) \times 100$$

où AA_{aliment}, AA_{digesta}, M_{aliment} et M_{digesta} correspondent aux teneurs en acide aminé (AA) et marqueur (M) dans l'aliment et le digesta (g/ kg MS).

Les données expérimentales sont analysées avec un modèle mixte (Proc Mixed, SAS 9.4, SAS Inst., Cary, NC) en utilisant l'animal comme unité expérimentale et en prenant en compte l'effet fixe du traitement et les effets aléatoires de la répétition et de l'interaction. Les comparaisons de moyennes sont effectuées selon un ajustement de Bonferroni.

2. RESULTATS

2.1. Fabrication des tourteaux

Lors de l'essai, l'extrusion a permis une extraction d'huile plus élevée que la cuisson (Tableau 1). Le décortage a entraîné une augmentation de près de 3% de la teneur en protéines (respectivement 58,8 et 58,4 g de MAT / 100 g de MS déshuilée pour les tourteaux EP et FCP décortiqués, et 56,0 et 55,8 g /100 g pour les tourteaux EP et FCP de graines entières).

Tableau 3 – Effet des procédés de traitement du soja sur les performances de croissance des porcelets^{1,2}

| | CL | EP-W | EP-D | FCP-W | FCP-D | ETR | P-value ³ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|----------------------|
| n | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | | |
| Poids à j1, kg | 11,6 | 11,5 | 11,6 | 11,5 | 11,6 | 1,4 | 0,99 |
| Poids à j28, kg | 29,0 ^a | 28,5 ^a | 28,8 ^a | 27,5 ^a | 20,6 ^b | 2,5 | < 0,01 |
| CMJ, g/j | 1029 ^a | 979 ^a | 994 ^a | 950 ^a | 794 ^b | 74 | < 0,01 |
| GMO, g/j | 622 ^a | 608 ^a | 616 ^a | 572 ^a | 323 ^b | 58 | < 0,01 |
| IC, kg/kg | 1,66 ^a | 1,61 ^a | 1,62 ^a | 1,66 ^a | 2,56 ^b | 0,22 | < 0,01 |

¹ Voir Tableaux 1 et 2. ² Les valeurs correspondent aux moyennes ajustées pour 10 porcelets par traitement. ³ Procédure mixte avec l'effet fixe du traitement (T), et les effets aléatoires de la répétition (R) et de l'interaction. ETR : écart-type du résidu. Les valeurs non indexées de la même lettre diffèrent (P < 0,05).

Tableau 4 – Effet des procédés de traitement du soja sur la rétention de l'azote (N) chez les porcs^{1,2}

| | CL | EP-W | EP-D | FCP-W | FCP-D | ETR | P-value ³ |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|------|----------------------|
| Ingéré, g | 32,8 ^a | 31,9 ^a | 30,8 ^a | 33,0 ^a | 25,2 ^b | 2,18 | < 0,01 |
| Excrétion fécale, g | 3,27 ^{ab} | 2,71 ^{bc} | 2,31 ^c | 2,97 ^{abc} | 3,56 ^a | 0,64 | < 0,01 |
| Excrétion urinaire, g | 6,60 ^a | 6,46 ^a | 6,43 ^a | 6,22 ^a | 3,90 ^b | 1,06 | < 0,01 |
| Excrétion totale, g | 9,87 ^a | 9,16 ^a | 8,74 ^{ab} | 9,19 ^a | 7,47 ^b | 1,23 | < 0,01 |
| Rétention, g | 23,0 ^a | 22,8 ^a | 22,1 ^a | 23,8 ^a | 17,7 ^b | 1,9 | < 0,01 |
| Digestibilité, % | 90,0 ^a | 91,5 ^a | 92,5 ^a | 91,0 ^a | 85,9 ^b | 2,0 | < 0,01 |
| Rétention, % de N ingéré | 69,8 | 71,3 | 71,5 | 72,1 | 70,3 | 3,6 | 0,68 |
| Rétention, % de N absorbé | 77,5 | 78,0 | 77,3 | 79,2 | 81,9 | 3,8 | 0,08 |

¹ Voir Tableaux 1 et 2. ^{2,3} Voir Tableau 3.

La solubilité dans la soude de la protéine apparaît augmentée par le décorticage des tourteaux EP (respectivement 76 contre 70 %) et FCP (89 contre 82 %). Les valeurs des inhibiteurs de la trypsine sont respectivement de 2,6, 3,5, 3,6 et 7,6 UIT/mg pour les tourteaux EP-W, EP-D, FCP-WH et FCP-D, et de 2,9 UIT/mg pour le tourteau CL. Avec le procédé FCP, la température de sortie cuiseur-sécheur mesurée est de l'ordre de 6°C plus basse pour les flocons D par rapport aux flocons W (90 contre 97°C), expliquant probablement la moindre inactivation des inhibiteurs de la trypsine dans le tourteau FCP-D.

Le ratio de lysine réactive, la constante d'hydrolyse (k) et le degré maximal d'hydrolyse des quatre tourteaux expérimentaux sont plus élevés que ceux du soja brut cru. La constante d'hydrolyse (k) est plus élevée pour le tourteau EP-W que pour les autres produits. Le décorticage augmente le degré maximal d'hydrolyse du tourteau provenant de l'extrusion (EP-D), mais pas celui du tourteau obtenu par cuisson (FCP-D). En effet, le décorticage augmente le degré d'hydrolyse si l'on suppose que la protéine de la coque est moins digeste que celle des amandes. L'absence d'effet pour le FCP-D pourrait s'expliquer par l'activité plus élevée des inhibiteurs de trypsine.

2.2. Performance et rétention de l'azote

Les performances des porcelets sont présentées dans le tableau 3, sauf pour le groupe CAS. En effet, les animaux du régime caséine de la première répétition ont faits d'importants refus d'aliment et eu une croissance réduite au cours des semaines 2 et 3. Aussi, l'aliment a été remplacé par le régime CL pour le reste de l'essai. Puis, lors de la période de bilan, les animaux du groupe CAS ont à nouveau reçu le régime à base de caséine. Comme la teneur en arginine de l'aliment CAS était nettement inférieure à celle des autres aliments, ce régime a été complété par 1 g/kg d'arginine lors de la 2^{ème} répétition, ramenant la teneur en arginine au même niveau que les régimes expérimentaux. Toutefois, le problème des refus d'aliment s'est à nouveau posé. Les porcs se sont rétablis après une injection de calcium, mais leurs données de performance ont été exclues de l'analyse.

Une différence significative de poids vif (PV) et de gain moyen quotidien (GMQ) entre les traitements apparaît dès la semaine 1 et se maintient tout au long de l'essai. Le GMQ des porcelets

recevant l'aliment CL est meilleur la première semaine, et celui du groupe FCP-D est plus faible tout au long de l'essai. La différence de PV et de GMQ est attribuée, du moins en partie, à la faible consommation d'aliment des porcs du lot FCP-D, ce qui entraîne un indice de consommation élevé.

Les résultats de l'étude de rétention de l'azote sont présentés au Tableau 4. Du fait des écarts de GMQ pendant l'essai de performance, le PV initial des porcs est différent entre les lots. Malgré l'utilisation d'un supplément d'acide sulfurique pour la plupart des cases, la rétention plus élevée pour un nombre limité de porcs au regard de leur GMQ individuel pourrait indiquer des pertes d'azote par volatilisation. Conformément à l'essai de performance, l'ingéré d'azote est significativement plus faible avec le traitement FCP-D qu'avec les autres traitements. L'excrétion fécale de l'azote est la plus faible chez les porcs recevant le régime EP-D, intermédiaire pour les régimes EP-W et FCP-W, et la plus élevée pour les porcs nourris avec les régimes FCP-D et CL. La digestibilité fécale est de 86 % dans le groupe FCP-D, ce qui est significativement inférieur par rapport aux autres régimes (en moyenne 91,3 % pour CL, EP-D, FCP-W et EP-W). L'excrétion urinaire et l'excrétion totale de N sont les plus faibles pour le lot FCP-D. Il n'y a pas de différence significative entre les traitements quant à l'efficacité de la rétention de l'azote par rapport à l'apport total ou digestible d'azote.

2.3. Digestibilité iléale apparente et standardisée

Les digesta ont été prélevés pour 9 porcelets CL, 10 EP-W, 8 EP-D, 10 FCP-W, 8 FCP-D et 7 CAS. Cependant, la taille de certains digesta FCP-DH étant insuffisante pour l'analyse, deux échantillons ont été poolés lors de chaque répétition (n=6).

Le tourteau de soja ou la caséine étant la seule source de protéines des aliments préparés, la digestibilité des acides aminés reflète la digestibilité iléale apparente des acides aminés des sources de protéines. Le flux d'acides aminés endogènes a été mesuré chez les porcs recevant le régime PP et utilisé pour calculer la DIS des acides aminés de chaque source de protéines (Tableau 5).

Les valeurs de DIS sont les plus élevées, proches de 100 %, pour la caséine. Cependant, la DIS très élevée de la glycine (140 %) semble être soit une surestimation de la valeur réelle, soit,

Tableau 5 – Digestibilité iléale standardisée des acides aminés des aliments expérimentaux^{1,2} (%)

| | CL n=9 | EP-W n=10 | EP-D n=8 | FCP-W n=10 | FCP-D ³ n=6 | CAS n=7 | ETR | P-value |
|----------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|------|---------|
| Ac. aspartique | 86,4 ^a | 90,2 ^a | 92,4 ^a | 93,1 ^a | 75,2 ^b | 97,5 ^a | 5,0 | < 0,01 |
| Thréonine | 86,9 | 92,4 | 97,8 | 97,4 | 82,0 | 100,9 | 4,8 | 0,17 |
| Sérine | 90,9 ^{ab} | 94,9 ^{ab} | 99,7 ^a | 98,4 ^a | 80,5 ^b | 96,9 ^{ab} | 4,8 | 0,02 |
| Ac. glutamique | 89,0 ^a | 90,8 ^a | 96,0 ^a | 94,3 ^a | 74,0 ^b | 93,3 ^a | 6,1 | < 0,01 |
| Proline | 102,3 ^{ab} | 91,3 ^{ab} | 107,0 ^a | 103,4 ^{ab} | 67,6 ^b | 107,3 ^{ab} | 13,4 | 0,04 |
| Glycine | 99,3 ^b | 99,8 ^b | 114,4 ^b | 109,9 ^b | 89,4 ^b | 140,9 ^a | 15,5 | < 0,01 |
| Alanine | 80,0 | 90,7 | 96,7 | 95,7 | 77,7 | 102,3 | 5,1 | 0,11 |
| Cystéine | 91,6 | 92,2 | 99,6 | 103,7 | 82,9 | 105,8 | 11,8 | 0,17 |
| Valine | 81,8 ^{ab} | 93,2 ^{ab} | 97,0 ^a | 93,9 ^{ab} | 74,7 ^b | 100,7 ^{ab} | 4,5 | 0,02 |
| Méthionine | 85,4 | 97,6 | 99,1 | 99,0 | 86,7 | 99,2 | 3,1 | 0,25 |
| Isoleucine | 82,0 ^{ab} | 93,2 ^{ab} | 98,4 ^a | 94,9 ^{ab} | 74,2 ^b | 101,3 ^a | 4,7 | 0,01 |
| Leucine | 84,7 ^{ab} | 93,0 ^{ab} | 97,4 ^a | 94,9 ^a | 73,6 ^b | 100,4 ^a | 3,9 | < 0,01 |
| Tyrosine | 83,6 ^{ab} | 92,3 ^{ab} | 96,9 ^a | 90,8 ^{ab} | 73,1 ^b | 101,0 ^a | 6,4 | 0,02 |
| Phénylalanine | 85,0 ^{ab} | 92,4 ^a | 96,0 ^a | 93,5 ^a | 73,8 ^b | 102,6 ^a | 3,6 | < 0,01 |
| Histidine | 91,3 ^a | 92,5 ^a | 97,9 ^a | 95,3 ^a | 79,1 ^b | 104,0 ^a | 3,9 | < 0,01 |
| Lysine | 85,6 | 93,6 | 97,7 | 96,3 | 81,4 | 98,6 | 3,4 | 0,04 |
| Arginine | 93,8 ^{ab} | 97,2 ^a | 100,1 ^a | 98,0 ^a | 83,2 ^b | 104,1 ^a | 3,1 | < 0,01 |
| Tryptophane | 99,4 | 97,0 | 100,2 | 96,1 | 91,6 | nd | 7,7 | 0,34 |
| Total | 88,3 ^{ab} | 92,4 ^{ab} | 98,0 ^a | 96,3 ^a | 76,4 ^b | 99,5 ^a | 4,6 | 0,01 |

¹Voir Tableaux 1 et 2. ²Le tourteau de soja ou la caséine étant la seule source de protéines des aliments préparés, la digestibilité des acides aminés reflète la digestibilité iléale des acides aminés des sources de protéines.

Tableau 6 – Teneur en AA totaux, TDIA et TDIS des tourteaux de soja obtenus par différents traitements chez le porc^{1,2} (g/100 g)

| | AA totaux | | | | TDIA | | | | TDIS | | | |
|----------------|-----------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| | EP-W | EP-D | FCP-W | FCP-D | EP-W | EP-D | FCP-W | FCP-D | EP-W | EP-D | FCP-W | FCP-D |
| Ac. aspartique | 5,70 | 5,95 | 5,30 | 5,74 | 4,67 | 4,79 | 4,86 | 3,83 | 5,17 | 5,32 | 5,33 | 4,32 |
| Thréonine | 1,94 | 2,03 | 1,81 | 1,96 | 1,47 | 1,56 | 1,58 | 1,27 | 1,81 | 1,94 | 1,90 | 1,61 |
| Sérine | 2,51 | 2,62 | 2,33 | 2,54 | 2,06 | 2,17 | 2,17 | 1,70 | 2,41 | 2,55 | 2,49 | 2,05 |
| Ac. glutamique | 8,95 | 9,34 | 8,31 | 9,01 | 7,63 | 8,07 | 7,93 | 6,09 | 8,19 | 8,66 | 8,45 | 6,67 |
| Proline | 2,46 | 2,56 | 2,28 | 2,47 | 1,72 | 2,04 | 2,01 | 0,85 | 2,30 | 2,67 | 2,55 | 1,41 |
| Glycine | 2,09 | 2,19 | 1,94 | 2,11 | 1,40 | 1,63 | 1,64 | 1,17 | 2,12 | 2,41 | 2,31 | 1,89 |
| Alanine | 2,20 | 2,29 | 2,04 | 2,21 | 1,69 | 1,81 | 1,80 | 1,39 | 2,02 | 2,16 | 2,11 | 1,72 |
| Cystéine | 0,73 | 0,76 | 0,67 | 0,73 | 0,48 | 0,54 | 0,55 | 0,41 | 0,68 | 0,73 | 0,76 | 0,61 |
| Valine | 2,42 | 2,53 | 2,25 | 2,44 | 1,97 | 2,07 | 2,02 | 1,53 | 2,26 | 2,38 | 2,29 | 1,82 |
| Méthionine | 0,70 | 0,73 | 0,65 | 0,70 | 0,63 | 0,64 | 0,63 | 0,55 | 0,69 | 0,70 | 0,69 | 0,61 |
| Isoleucine | 2,31 | 2,41 | 2,14 | 2,32 | 1,85 | 1,97 | 1,91 | 1,42 | 2,16 | 2,30 | 2,20 | 1,72 |
| Leucine | 3,69 | 3,85 | 3,42 | 3,71 | 3,08 | 3,24 | 3,15 | 2,36 | 3,47 | 3,65 | 3,51 | 2,73 |
| Tyrosine | 1,67 | 1,74 | 1,55 | 1,68 | 1,42 | 1,49 | 1,39 | 1,10 | 1,55 | 1,64 | 1,51 | 1,23 |
| Phénylalanine | 2,52 | 2,63 | 2,34 | 2,54 | 2,15 | 2,24 | 2,17 | 1,67 | 2,35 | 2,45 | 2,36 | 1,87 |
| Histidine | 1,33 | 1,39 | 1,24 | 1,34 | 1,07 | 1,13 | 1,11 | 0,89 | 1,24 | 1,32 | 1,27 | 1,06 |
| Lysine | 3,06 | 3,20 | 2,84 | 3,08 | 2,61 | 2,73 | 2,70 | 2,23 | 2,90 | 3,03 | 2,96 | 2,51 |
| Arginine | 3,71 | 3,88 | 3,45 | 3,74 | 3,41 | 3,49 | 3,44 | 2,88 | 3,65 | 3,75 | 3,66 | 3,11 |
| Tryptophane | 0,65 | 0,68 | 0,61 | 0,66 | 0,58 | 0,60 | 0,57 | 0,54 | 0,64 | 0,67 | 0,63 | 0,60 |

¹Voir Tableaux 1 et 2. ²AA : acides aminés; TDIA : Teneur en acide aminé digestible correspondant à la digestibilité iléale apparente (TDIA), standardisée (TDIS). La teneur en méthionine digestible est légèrement surestimée en raison de la supplémentation en DL-méthionine.

moins probablement, une perte endogène spécifique en glycine. Les DIS montrent les mêmes tendances que les DIA (données non présentées). En accord avec la digestibilité fécale de l'azote, le tourteau FCP-D présente la moins bonne qualité protéique, puisque la DIS du total des acides aminés est la plus faible parmi les tourteaux de soja. Les tourteaux EP-D, EP-W et FCP-W présentent une DIS élevée et dans le cas de la thréonine, la sérine, l'alanine, la valine, la méthionine, la leucine, la phénylalanine, la lysine et le total des acides aminés, elle est numériquement supérieure à celle du tourteau CL.

La composition en acides aminés totaux, DIA et DIS des quatre tourteaux partiellement déshuilés est présentée au Tableau 6. Il est à noter que tous les aliments sont supplémentés en DL-méthionine afin de ne pas limiter la croissance. La teneur en méthionine digestible est donc légèrement surestimée.

3. DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette étude est la première à déterminer selon un plan factoriel l'effet des procédés d'extrusion ou de cuisson en combinaison avec le décorticage pour produire, à partir de graines cultivées en Europe, quatre tourteaux de soja partiellement déshuilés.

Les tourteaux expérimentaux ainsi produits ont des compositions différentes, mais présentent globalement des teneurs en MAT plus élevées et en MG plus faibles que celles référencées pour le tourteau expeller (respectivement 44,7±2,3 et 7,0±1,1 g/100 g brut, n=59) par la base Feedipedia (Heuzé et al., 2019). Le tourteau témoin CL a des teneurs MAT, MG et CB légèrement plus faibles que celles de la même base (respectivement 45,5±1,1 et 1,8±0,4 et 5,9±0,8 g/100 g brut, n=33418). Ainsi, l'impact des procédés de trituration sur la composition des tourteaux est confirmé, en accord avec

l'enquête de Karr-Lilienthal *et al.* (2006) qui mesurent des différences substantielles pour la composition en acides aminés et la qualité des protéines des tourteaux produits par extrusion pression aux Etats-Unis alors que les graines de soja arrivant dans les installations sont assez homogènes.

Dans notre étude, les procédés EP-W, EP-D et FCP-W associant extrusion ou cuisson humide et pression ont réduit l'activité anti-trypsique tout en conservant une bonne qualité de la protéine. Les valeurs élevées de digestibilité fécale et de rétention de l'azote pourraient s'expliquer en partie par les pertes d'azote par volatilisation. La digestibilité des acides aminés et particulièrement de la lysine (94-98 %) est également élevée. Cependant, on peut penser que cela n'est pas le résultat d'une surestimation significative puisque les valeurs DIS pour la caséine sont proches de 100 %. Les résultats pour ces tourteaux sont en accord avec les meilleures digestibilités iléales des acides aminés des tourteaux EP par rapport au tourteau extrait par solvant mesurées par Woodworth *et al.* (2001) puis Baker et Stein (2009), à l'inverse des résultats d'Opapeju *et al.* (2006). De bonnes performances de croissance sont également obtenues chez le porcelet et le porc en engraissement avec les tourteaux EP étudiés par Webster *et al.* (2003).

La teneur plus élevée en inhibiteurs de la trypsine du tourteau FCP-D apparaît comme un artéfact de notre dispositif pouvant facilement être maîtrisé. Lors du pré-essai de choix des paramètres (temps de cuisson, température) des procédés EP et FCP effectué avec les mêmes graines décortiquées, aucun

tourteau n'avait une activité supérieure à 4,4 UIT/mg. Par ailleurs, la hausse de solubilité de la protéine constatée avec le décortiquage n'a pas été vérifiée lors de tests précédents (Quinsac *et al.*, 2005) et peut s'expliquer par les conditions de fabrication dans l'essai.

A *contrario*, l'étude confirme que la température de transformation des produits à base de soja est cruciale pour la qualité des protéines et le niveau des facteurs antinutritionnels (Webster *et al.*, 2003 ; Quinsac *et al.*, 2012 ; Karr-Lilienthal *et al.*, 2006). Dans l'étude, l'emploi du tourteau comme seule source de protéine correspond à une teneur dans l'aliment de 2,7 UIT/mg proche de la valeur maximale de 3,0 UIT/mg proposée pour le porc en croissance (Royer *et al.*, 2015).

On peut conclure que les quatre procédés, y compris le procédé FCP-D bien conduit, sont adaptés à des usines de trituration de taille moyenne et peuvent produire des tourteaux de soja de bonne qualité avec 47-52 g/100 g protéine brute, 4-7 g/100 g d'huile résiduelle, une faible activité résiduelle d'inhibiteur de la trypsine, en préservant la solubilité des protéines et issus de cultures de soja locales et sans OGM.

REMERCIEMENTS

L'étude a été réalisée dans le cadre du projet Feed-a-Gene financé par le programme H2020 de l'Union européenne (n° accord 633631).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AOAC, 1990. Official methods of analysis (15th Ed.). Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA, 1298 pp.
- Bakker K.M., Stein H.H., 2009. Amino acid digestibility and concentration of digestible and metabolizable energy in soybean meal produced from conventional, high-protein, or low-oligosaccharide varieties of soybeans and fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 87, 2282–2290.
- Commission Européenne, 2019. EU feed protein balance sheet 2017/18. https://ec.europa.eu/info/news/commission-publishes-overview-eu-feed-supply-2019-may-20_en
- De Visser C.L.M., Schreuder R., Stoddard F., 2014. The EU's dependency on soya bean import for the animal feed industry and potential for EU produced alternatives. *OCL Journal*, 21(4), D407, <https://doi.org/10.1051/ocl/2014021>.
- Heuzé V., Tran G., Kaushik S., 2019. Soybean meal. Feedipedia, a programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. <https://www.feedipedia.org/node/674>.
- Hoffmann E.M., Selje-Assmann N., Becker K., Wallace R.J., Broderick G.A., 2010. Screening for anti-proteolytic compounds. In: *In vitro screening of plant resources for extra-nutritional attributes in ruminants: nuclear and related methodologies*, vol. 1, pp. 55-86 (P.E. Vercoe, H.P.S. Makker, A.C. Schlink, editors). Springer Science and Business Media B.V., Dordrecht.
- Hulshof T.G., Bikker P., Van der Poel A.F.B., Hendriks W.H., 2016. Assessment of protein quality of soybean meal and 00-rapeseed meal toasted in the presence of lignosulfonate by amino acid digestibility in growing pigs and Maillard reaction products. *J. Anim. Sci.*, 94, 1020-1030.
- Karr-Lilienthal L.K., Bauer L.L., Utterback P.L., Zinn K.E., Frazier R.L., Parsons C.M., Fahey G.C., 2006. Chemical composition and nutritional quality of soybean meals prepared by extruder/expeller processing for use in poultry diets. *J. Agric. Food Chem.*, 54(21), 8108-8114.
- Martin N., 2015. Domestic soybean to compensate the European protein deficit: illusion or real market opportunity? *OCL Journal*, 22(5) D502. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015032>
- Opapeju F.O., Golian A., Nyachoti C.M., Campbell L.D., 2006. Amino acid digestibility in dry extruded-expelled soybean meal fed to pigs and poultry. *J. Anim. Sci.*, 84, 1130-1137.
- Quinsac A., Bouvarel I., Buffo P., Burghart P., Carré P., Duroueix F., Evrard J., Larroudé P., Leroux Y., Lessire M., Loison J.P., Métayer D., Pagès X., Raimbault J., 2005. Intérêt de différents tourteaux de soja partiellement déshuilés par extrusion-pression, pour l'élevage de poulets label. *Journées Rech. Avicole*, 6, 297-301.
- Quinsac A., Labalette F., Carré P., Janowski M., Fine F., 2012. Comment valoriser dans l'alimentation animale, les graines de soja produites en France ? Comparaison de deux procédés de transformation : l'aplatissage-cuisson-pression et l'extrusion-pression. *OCL*, 19 (6), 347-357. <https://doi.org/10.1051/ocl.2012.0484>
- Royer E., Alibert L., Serin J.F., Gasser A.L., Quinsac A., Labalette F., 2015. Effects of the trypsin inhibitor concentration in pig fattening diets on performance, health and carcass parameters. Poster, 13th Int. Symp. Digestive Physiology of Pigs, May 19-21, 2015, Kliczków, Poland.
- Salazar-Villanea S., Hulshof T.G., Van der Poel A.F.B., Bruininx E.M., Bikker P., 2016. Predicting the standardized ileal protein digestibility of processed soybean meal and rapeseed meal in growing pigs using two in vitro methods. *J. Anim. Sci.*, 94, 202-206.
- Stein H.H., Sève B., Fuller M.F., Moughan P.J., De Lange C.F.M., 2007. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: Terminology and application. *J. Anim. Sci.*, 85, 172-180.
- Webster M.J., Goodband R.D., Tokach M.D., Nelssen J.L., Drits S.S., Woodworth J.C., De La Llata M., Said N.W., 2003. Evaluating processing temperature and feeding value of extruded-expelled soybean meal on nursery and finishing pig growth performance. *J. Anim. Sci.*, 81, 2032-40.
- Woodworth J.C., Tokach M.D., Goodband R.D., Nelssen J.L., O'Quinn P.R., Knabe D.A., Said N.W., 2001. Apparent ileal digestibility of amino acids and the digestible and metabolizable energy content of dry extruded-expelled soybean meal and its effects on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.*, 79, 1280–1287.