

Impact du broyage des matières premières et du mode de granulation du régime sur les pertes endogènes iléales et la disponibilité des acides aminés chez le porc en croissance

Ludovic LAHAYE, Philippe GANIER, Jean-Noël THIBAUT, Bernard SÈVE

INRA Unité Mixte de Recherches sur le Veau et le Porc, 35590 Saint-Gilles

Avec la collaboration de Y. LEBRETON et F. LE GOUËVEC

Impact du broyage des matières premières et du mode de granulation du régime sur les pertes endogènes iléales et la disponibilité des acides aminés chez le porc en croissance.

Chez le porc, la valeur d'une protéine alimentaire s'apprécie par la disponibilité de ses acides aminés. Celle-ci est mesurée par la digestibilité iléale standardisée, mais elle varie aussi en fonction des pertes digestives d'origine endogène spécifiquement induites par l'aliment. Deux modalités de broyage, entraînant des tailles de particules différentes, et deux modes de granulation, « classique » et par « extrusion à haut débit », ont été appliqués à un mélange blé-tourteau de tournesol. Leur impact sur les pertes endogènes spécifiques et la digestibilité réelle des acides aminés a été mesuré par la technique de dilution isotopique au moyen du marquage de l'animal sur des porcs préparés en anastomose iléo-rectale. La diminution de la taille des particules de 1000 µm à 500 µm du mélange améliore les digestibilités apparentes, standardisées et réelles de l'azote et des acides aminés ainsi que la digestibilité de l'énergie. Le traitement de granulation par « extrusion à haut débit », en comparaison avec une granulation « classique » améliore les coefficients de digestibilité de l'énergie et ceux de l'azote et des acides aminés. Cette amélioration est attribuable à la réduction des pertes endogènes spécifiques. La granulation « classique » tend à réduire ces pertes endogènes spécifiques d'acides aminés et cet effet est significatif avec l'application de la granulation par « extrusion à haut débit ». Il en résulte une augmentation de la disponibilité des acides aminés directement attribuable à la prise en compte de la réduction du coût métabolique associé à ces pertes. La variation de la digestibilité standardisée ne rend pas compte de cette amélioration.

Impact of raw material particle size and pelleting of diets on specific endogenous amino acid losses and nutritional availability of amino acids for growing pigs

In the pig, protein value of a feed depends on the availability of its amino acids, estimated by the measurement of standardised ileal digestibility. However, amino acid availability is also influenced by endogenous digestive losses specifically associated with the type of feed. A wheat-sunflower meal mix was milled according to two methods, to produce different particle sizes, and pelleted according to two processes, "regular" and "high flow extrusion". The impact of these treatments on the specific endogenous losses and real digestibility of amino acids was measured by the isotopic dilution method using labelled pigs fitted with ileorectal anastomosis. Apparent, standardised and real digestibilities of nitrogen and amino acids, as well as energy digestibility were improved by decreasing feed particle size from 1000 µm to 500 µm. The "high flow extrusion" pelleting process increased energy digestibility and improved nitrogen and amino acid digestibility compared to the "regular" process. This improvement was due to a reduction in specific endogenous losses. The pelleting process tended to decrease the specific endogenous losses of amino acids and this effect was significant in the case of the "high flow extrusion" process. This resulted in an increase in the true availability of amino acids, due to lower metabolic costs associated with the production of endogenous protein. The variations in the standardised digestibility of amino acids measured in the experiment did not reflect the change in amino acid availability.

INTRODUCTION

La nutrition porcine au service des objectifs de production nécessite une connaissance appropriée de la valeur des matières premières, et notamment de l'apport protéique. Cette évaluation peut être réalisée par la mesure de digestibilité de l'azote et des acides aminés. Selon la méthode et les pertes digestives prises en compte, plusieurs définitions de cette digestibilité peuvent être formulées. A la distinction entre fécale et iléale, s'ajoutent les différentes manières de prendre en compte les pertes endogènes. En effet, la digestion de l'aliment s'accompagne de sécrétions digestives azotées dans la lumière intestinale. Chez le porc, même si 75 % de cet azote sont réabsorbés (SOUFFRANT et al., 1986), plus de la moitié de l'azote rejeté à la fin de l'iléon est d'origine endogène (LETERME et al., 1996 ; DE LANGE et al., 1990). Ces pertes endogènes comprennent deux composantes, une perte « basale » correspondant aux pertes obligatoires d'entretien de l'animal et une autre « spécifique » des constituants alimentaires (SÈVE, 1994). En l'absence de distinction dans les digesta entre l'azote indigestible d'origine alimentaire et l'azote provenant de l'animal, on détermine une digestibilité apparente. La correction de l'azote iléal par la fraction basale permet de calculer une digestibilité vraie ou standardisée plus caractéristique de la matière première testée et « additive » en terme de formulation. La correction par la totalité des pertes azotées endogènes permet quant à elle de calculer une digestibilité dite réelle, car ne concernant que l'azote d'origine alimentaire. On peut ainsi caractériser ou évaluer plus spécifiquement la matière première étudiée. Cependant cette digestibilité ne rend pas compte de l'aptitude de la protéine testée à fournir des acides aminés « disponibles » pour le métabolisme et pour l'accrétion protéique. En effet, une part des acides aminés réellement digestibles sera directement utilisée avec un certain rendement pour la production des protéines endogènes. Nous avons montré précédemment que la perte de protéines endogènes joue un rôle aussi important que la digestibilité réelle dans la valeur nutritive des protéines de certaines matières premières alimentaires (HESS et al., 2000). Par ailleurs, l'impact de la technologie de préparation des aliments sur la digestibilité iléale réelle et les pertes endogènes des acides aminés n'a fait l'objet chez le porc que d'un nombre limité d'études portant surtout sur la granulométrie obtenue après broyage (WÜNSCHE et al., 1987), alors que les effets de la granulation sont très mal connus.

L'objectif de cette étude était de tester l'impact de différents modes de préparation d'un aliment sur la digestibilité et la disponibilité de ses acides aminés. Nous avons ainsi comparé deux modalités de broyage et deux modes de granulation en mesurant la digestibilité réelle et les pertes endogènes d'acides aminés ainsi que leur impact sur la rétention azotée corporelle. Pour cela, on a utilisé la technique de la dilution isotopique par marquage de l'animal au moyen de leucine ¹⁵N.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1. Animaux, régimes et schéma expérimental

Un aliment complet a été formulé sur la base d'un mélange de blé et de tourteau de tournesol (tableau 1). Il a été sup-

Tableau 1 - Composition de l'aliment (g/kg)

| | Régimes ⁽¹⁾ | Protéoprive |
|--|------------------------|-------------|
| Blé | 734,3 | - |
| Tourteau de tournesol | 177,5 | - |
| Amidon de maïs | - | 808,3 |
| Huile végétale | - | 33,0 |
| Graisse animale | 28,1 | - |
| Phosphate bicalcique | 13,6 | - |
| Phosphate monocalcique (H₂O) | - | 28,5 |
| Carbonate de calcium | 8,7 | 2,6 |
| Sel | 4,4 | 4,5 |
| L-Lysine, HCL | 4,7 | - |
| L-Thréonine | 0,9 | - |
| Cellulose de bois | - | 38,0 |
| Sucre | - | 50,0 |
| Chlorure de potassium | - | 3,0 |
| Chlorure de Magnesium (6H₂O) | - | 3,5 |
| Bicarbonate de soude | 22,1 | 22,8 |
| Prémix ⁽²⁾ | 4,9 | 5,0 |
| Vit. Shunt ⁽³⁾ | 0,8 | 0,8 |
| Analyses | | |
| N (% MS) | 2,75 | 0,04 |
| Energie brute (MJ/kgMS) | 18,81 | 16,72 |
| NDF (% MS) | 19,01 | 4,07 |
| ADF (% MS) | 6,95 | 1,91 |
| ADL (% MS) | 1,57 | - |

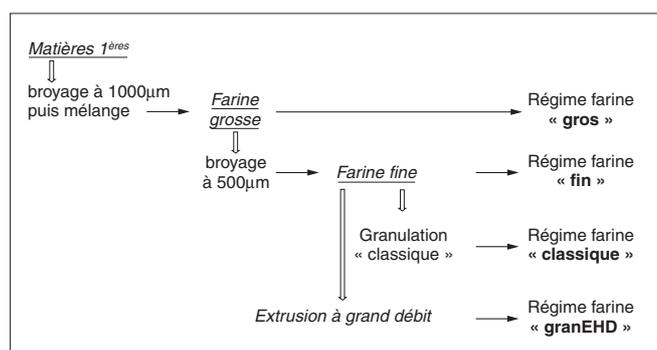
⁽¹⁾ Acides aminés (g/kgMS): Met 2.9 ; Cys 3.4 ; Lys 8.9 ; Thr 6.3 ; Trp 2.1 ; Arg 10.9 ; Ile 6.1 ; Leu 11.3 ; Val 7.8 ; His 4.2 ; Phe 7.6 ; Gly 8.3 ; Ser 7.2 ; Ala 6.8 ; Asp 11.8 ; Glu 39.0.

⁽²⁾ Prémix (mg ou UI/ kg d'aliment) : Fe, 80mg ; Cu, 10mg ; Mn, 40mg ; Zn, 100mg ; Co, 0,1mg ; I, 0,2mg ; Se, 0,15mg ; vitamines : A, 5000 UI ; D3, 1000 UI ; E, 20mg ; K3, 2mg ; B1, 2mg ; B2, 4mg ; PP, 15mg ; B5, 10mg ; B6, 1mg ; B8, 0,2mg ; B9, 1mg ; B12, 0,02mg ; choline, 500mg.

⁽³⁾ Vitamines pour animaux munis d'un shunt iléo-rectal (mg ou UI/ kg d'aliment) : A, 17600 UI ; E, 20 UI ; K3 (pure), 19,2mg ; B1, 3,9mg ; B2, 3,2mg ; B5, 10mg ; B6, 3,2mg ; B8, 0,07mg ; B9, 0,8mg ; B12, 0,02mg ; C, 40mg ; PP, 20mg.

plémenté en L-lysine-HCl et L-thréonine. Les quatre régimes qui en sont issus sont des variantes technologiques de cet aliment (schéma 1). On distingue ainsi deux régimes farines : « gros » et « fin » de taille de particules 1000 et 500 µm respectivement (tableau 2) et deux régimes granulés : « classique » (indice de dureté des granulés en Mpa = 2,89 ± 0,90) et « granEHD » (indice de dureté des granulés en Mpa = 2,87 ± 1,65). Un régime protéoprive a également été élaboré afin de mesurer les pertes endogènes basales.

Les porcs mâles castrés Piétrain X (Landrace x Large-White) ont subi une anastomose iléo-rectale termino-terminale (LAPLACE et al., 1989) et un cathéter a été posé dans la veine jugulaire, l'artère carotide et la veine porte. Le dispositif expérimental est un carré latin 4 X 4 pour la distribution des régimes protéiques. Les animaux reçoivent en cinquième période le régime protéoprive.



Broyage à 1000µm : broyeur vertical de 150 CV, 3000 tr/min, grille de 6 mm

Broyage à 500µm : broyeur vertical 2 X 100 CV, 3000 tr/min, grille de 2,5 mm

Granulation « classique » : presse de 270 CV, 70-80°C ~5 secondes, grille de 4 mm

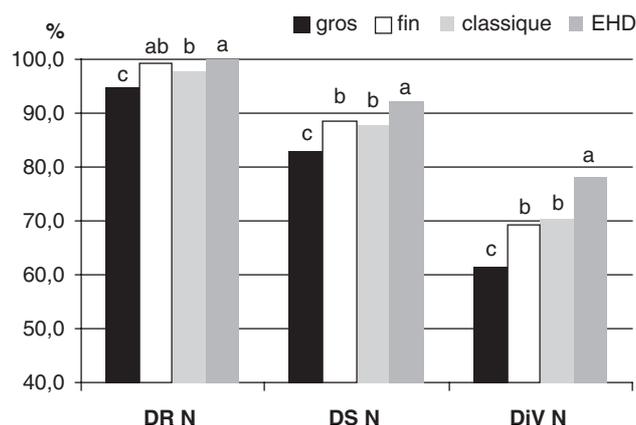
Granulation par extrusion à haut débit ("granEHD") : presse de 470 CV combinée d'un préconditionneur (3-5 min au conditionneur à 90°C, 8% vapeur) et d'une grille de granulation-extrusion de 4 mm (145°C, 1-2 secondes)

Schéma 1 - Schéma des traitements technologiques appliqués aux matières premières et aux farines

Le niveau d'alimentation des animaux est fixé à 80 grammes de matière sèche ingérée par kilogramme de poids métabolique (poids vif^{0,75}). Les aliments sont tous servis deux fois par jour sous forme de soupe, après délitage des granulés dans l'eau, afin de tester l'effet de la préparation technologique indépendamment du mode de présentation du repas. Les animaux sont pesés une fois par semaine en début de période (période de 7 jours). Après 4 jours d'adaptation au régime, des collectes complètes sont effectuées sur deux jours (les 5 et 6^{èmes} jours de la période) au lieu des 3 jours habituels sauf pour le régime protéoprive. Les jus iléaux sont collectés dans des bacs avec 500 ml d'acide sulfurique 0,36 M deux fois par jour au moment des repas. Les urines sont collectées quotidiennement dans 20 ml d'acide sulfurique 1,8 M. Le matin du 7^{ème} jour, les animaux reçoivent un repas d'épreuve marqué au chrome équivalant à la 1/2 ration quotidienne. La seconde moitié de la ration est distribuée à 15h30. Les digesta sont alors collectés ce 7^{ème} jour toutes les heures de 10h00 à 19h00 dans des sachets de plastique sans acide, puis à 08h30 le

lendemain matin. Ces sachets sont immédiatement pesés et congelés.

Les animaux sont perfusés 24h/24 avec une solution stérile de leucine ¹⁵N à raison de 9 mg par kilogramme de poids métabolique pendant les 28 jours de période expérimentale à un débit de 2 ml/h. La perfusion est réalisée dans la veine jugulaire. Le jour des collectes, 3 types d'échantillons de sang sont constitués. Le premier correspond à un prélèvement effectué avant le repas de 08h00. Le second correspond à un pool constitué à partir des prélèvements à 08h00 à jeun, 10h00, 12h00 et 14h00. Le troisième correspond au prélèvement effectué avant le second repas de 15h30. Les prélèvements de sang sont réalisés dans la veine porte et dans l'artère carotide pour un volume total de 60 ml de sang par jour et par animal. Les différents échantillons sont centrifugés puis le plasma congelé. Les plasmas sont regroupés par vaisseau et par type de prélèvement sur les 3 jours de collecte constituant au final pour chaque porc et régime expérimental, un échantillon « 08h00 à jeun », « 16h00 avant repas » et un échantillon « pool 08h00-14h00 » aussi bien au niveau porte qu'au niveau carotide.



les moyennes auxquelles sont attribués des indices différents sont significativement différentes entre elles ($P < 0,05$).

Figure 1 - Digestibilité Réelle, Standardisée et Disponibilité Vraie de l'N exprimées en pourcentage de la DR obtenue avec le régime granEHD.

Tableau 2 - Distribution granulométrique des farines (%)

| Farine | grossière | fine |
|---|-----------|-------|
| Vide de maille, µm | | |
| 2500-1600 | 30.7 | - |
| 1600-630 | 42.2 | 35.3 |
| 630-250 | 19.5 | 43.9 |
| < 250 | 7.6 | 20.8 |
| Diamètre médian des particules (d50), µm | 954.5 | 462.5 |
| Ecart-type géométrique (Sg) | 2.11 | 1.89 |

Tamis DIN/ISO 3310-1 montés sur un tamiseur RESTCH AS 200 Control "g" (10 min ; amplitude 1.22).

1.2. Analyses

Cette étude visait également à tester l'influence du site et du temps de prélèvement des échantillons de sang sur la détermination des pertes endogènes par la méthode de dilution isotopique. Par ailleurs, le marquage au chrome et les collectes sériées journalières étaient destinés à établir l'impact des régimes sur les cinétiques post-prandiales d'excrétion d'azote endogène et alimentaire. Nous ne présenterons ici que les résultats concernant l'étude de digestibilité et de disponibilité, obtenus avec les échantillons du pool « 08h00-14h00 » de la veine porte, la veine porte apparaissant être le site de prélèvement le plus approprié (HESS et al., 1998).

Les échantillons de digesta sont tous lyophilisés. Une collecte sur 3 jours est reconstituée à partir des collectes de 2 jours et de la collecte sériée du lendemain. Les contenus en acides aminés (AA) des digesta et régimes sont déterminés par chromatographie d'échanges d'ions par le laboratoire Degussa. L'azote (N) est déterminé par la méthode de Dumas (Leco FP 428, St Joseph, Missouri, USA) et les matières sèches (MS) par dessiccation à l'étuve à 103°C. L'¹⁵N est analysé grâce à un analyseur élémentaire (Carlo Erba, NA 1500) couplé à un spectromètre de masse isotopique (Micromass, Optima). La mesure d'enrichissement isotopique des acides aminés est réalisée sur les digesta et les régimes hydrolysés (HCL 6M, 110°C, 23h) ainsi que sur la fraction TCA-soluble des échantillons de plasma. Pour ce faire les échantillons sont au préalable purifiés sur une résine échangeuse de cations (Dowex 50W, Sigma 50X8-200, St. Louis, MO). Les enrichissements en ¹⁵N des acides aminés sont ensuite déterminés par chromatographie gazeuse couplée à un four de combustion et un spectromètre de masse isotopique (GC/C/IRMS) (Isochrom, Micromass, Sheshire, UK).

1.3. Calculs

Les pertes endogènes iléales totales d'N ou AA exprimées en gramme par kilogramme de matière sèche ingérée (Nendo en g/kgMSI) sont calculées selon l'équation suivante (DE LANGE et al., 1990) :

$$\text{Nendo} = (\text{Ndigesta} \times (\text{Edigesta} - \text{Erepas}) / (\text{Esang} - \text{Erepas})) / \text{MSI}$$

Où Ndigesta représente la quantité d'N (AA) dans les jus iléaux ; Edigesta, Esang, Erepas sont les enrichissements respectifs d'N (AA) dans les digesta, la fraction soluble dans le TCA du plasma et le régime.

Les différents coefficients de digestibilité de l'N (AA) sont calculés comme suit :

Digestibilité Apparente :

$$\text{DA} = 100 \times (I - E) / I$$

Digestibilité Standardisée ou vraie :

$$\text{DS} = 100 \times (I - (E - \text{Nendob})) / I$$

Digestibilité Réelle :

$$\text{DR} = 100 \times (I - (E - \text{Nendo})) / I$$

Où I est la quantité d'N (AA) ingérée par Kg de matière sèche ; E : la quantité d'N (AA) excrétée par kg de MSI ; Nendob : la quantité d'N (AA) excrétée lors de l'ingestion d'un kg de régime protéoprive.

La partition de l'azote réellement digéré (Nd) entre les pertes endogènes et le dépôt protéique est décrite par le modèle suivant (SÈVE, 1994 ; SÈVE et al., 2000) :

$$\text{Nd} = I \times \text{DR}$$

$$I \times \text{DR} = (\text{Nb} / \text{Kb}) + (\text{Nendo} / \text{ke})$$

$$\text{Nb} / (I \times \text{DR}) = \text{Kb} - (\text{Nendo} / (I \times \text{DR})) \times (\text{Ke} / \text{Kb})$$

Disponibilité Vraie :

$$\text{DiV} = \text{DS} - (\text{DR} - \text{DS}) \times (1 / \text{Ke} - 1)$$

Où Nb représente l'azote retenu, Kb le rendement pour la rétention corporelle d'azote et Ke le rendement pour la synthèse nette des protéines endogènes. L'estimation des coefficients Ke et Kb peut être réalisée à partir de la régression intra-animal de l'N ou des AA retenus (Nb) sur l'N ou les AA endogènes (Nendo). Nb a été déterminé par la mesure du bilan azoté, Ke et Kb par une analyse de régression non linéaire à l'aide de la procédure NLIN (SAS, 1989).

Les résultats sont testés statistiquement par analyse de variance avec la procédure GLM (SAS, 1989) en tenant compte des effets « animal » et « régime ». L'effet « période » a été écarté en raison des refus prolongés d'un animal qui ont déséquilibré le carré latin. Si l'effet régime est significatif, les moyennes ajustées sont comparées deux à deux par le test de Student.

2. RÉSULTATS

Les résultats de digestibilité apparente et standardisée sont présentés dans le tableau 3. La diminution de la granulométrie augmente de façon significative les coefficients de digestibilité de la matière sèche, de l'énergie et de la matière organique. Il en va de même de la granulation à « haut débit » appliquée à l'aliment finement broyé. Le régime « gros » est le moins digestible. Le broyage à 500 µm améliore significativement la digestibilité apparente et standardisée de l'N et des AA. La granulation de type classique de ce régime « fin » ne modifie pas la digestibilité de l'N ou des AA. La granulation à haut débit du régime « fin » améliore quant à elle de façon significative les digestibilités apparentes et standardisées de l'ensemble des AA à l'exception toutefois de la lysine et de la proline. De la même façon, la digestibilité du régime « granEHD » est à l'exception de l'arginine, la lysine, la méthionine, la proline et l'alanine, significativement supérieure à celle du traitement de granulation « classique ».

Tableau 3 - Impact technologique sur les digestibilités iléales apparentes et standardisées

| Farine Granulation | Digestibilité Apparente | | | | | Digestibilité Standardisée | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|------|----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|------|
| | grosse - | - | fine class. ¹ | EHD ² | SEM | grosse - | - | fine class. ¹ | EHD ² | SEM |
| MS | 61,8 ^c | 67,5 ^b | 65,7 ^b | 70,5 ^a | 0,89 | - | - | - | - | - |
| Energie | 64,9 ^c | 70,9 ^b | 69,7 ^b | 74,1 ^a | 0,86 | - | - | - | - | - |
| Mat. Org. | 66,3 ^c | 72,0 ^b | 70,2 ^b | 74,6 ^a | 0,75 | - | - | - | - | - |
| N | 70,2 ^c | 75,3 ^b | 74,7 ^b | 78,4 ^a | 0,87 | 74,2 ^c | 79,2 ^b | 78,6 ^b | 82,4 ^a | 0,86 |
| Acides aminés essentiels | | | | | | | | | | |
| Arg | 83,8 ^c | 86,0 ^b | 86,9 ^{ab} | 88,1 ^a | 0,48 | 86,0 ^c | 88,2 ^b | 89,2 ^{ab} | 90,4 ^a | 0,48 |
| His | 75,0 ^c | 78,4 ^b | 78,6 ^b | 82,3 ^a | 0,70 | 78,0 ^c | 81,4 ^b | 81,5 ^b | 85,3 ^a | 0,70 |
| Lys | 59,5 ^b | 66,1 ^a | 67,8 ^a | 70,3 ^a | 1,45 | 64,7 ^b | 71,3 ^a | 73,0 ^a | 75,4 ^a | 1,45 |
| Phe | 76,6 ^c | 80,4 ^b | 81,5 ^b | 84,1 ^a | 0,56 | 79,9 ^c | 83,7 ^b | 84,8 ^b | 87,4 ^a | 0,56 |
| Leu | 76,0 ^c | 79,4 ^b | 80,8 ^b | 83,4 ^a | 0,73 | 79,3 ^c | 82,7 ^b | 84,2 ^b | 86,7 ^a | 0,73 |
| Ile | 75,7 ^c | 78,5 ^b | 80,1 ^b | 82,6 ^a | 0,60 | 79,2 ^c | 82,0 ^b | 83,6 ^b | 86,1 ^a | 0,59 |
| Val | 72,7 ^c | 75,9 ^b | 77,6 ^b | 80,5 ^a | 0,64 | 76,3 ^c | 79,5 ^b | 81,2 ^b | 84,0 ^a | 0,64 |
| Met | 80,6 ^c | 84,3 ^b | 85,7 ^{ab} | 86,5 ^a | 0,69 | 83,1 ^c | 86,6 ^b | 88,0 ^{ab} | 88,8 ^a | 0,69 |
| Thr | 62,6 ^c | 67,3 ^b | 67,7 ^b | 72,9 ^a | 1,06 | 68,6 ^c | 73,3 ^b | 73,8 ^b | 78,9 ^a | 1,06 |
| Acides aminés non-essentiels | | | | | | | | | | |
| Asp | 69,7 ^c | 74,0 ^b | 74,3 ^b | 78,2 ^a | 0,84 | 73,8 ^c | 78,1 ^b | 78,4 ^b | 82,3 ^a | 0,84 |
| glu | 86,3 ^c | 89,6 ^b | 90,0 ^b | 91,7 ^a | 0,38 | 87,8 ^c | 91,1 ^b | 91,5 ^b | 93,2 ^a | 0,38 |
| Ser | 72,8 ^c | 75,8 ^b | 75,8 ^b | 79,8 ^a | 0,88 | 76,9 ^c | 79,9 ^b | 79,8 ^b | 83,8 ^a | 0,88 |
| Gly | 64,1 ^c | 67,5 ^b | 67,1 ^{bc} | 72,6 ^a | 0,97 | 68,4 ^c | 71,8 ^b | 71,4 ^b | 76,9 ^a | 0,97 |
| Ala | 63,7 ^c | 71,4 ^b | 72,6 ^{ab} | 75,5 ^a | 1,01 | 67,9 ^c | 75,6 ^b | 76,8 ^{ab} | 79,7 ^a | 1,01 |
| Cys | 76,0 ^b | 78,4 ^b | 78,0 ^b | 82,3 ^a | 1,02 | 79,6 ^b | 82,0 ^b | 81,7 ^b | 85,9 ^a | 1,02 |
| Pro | 81,8 ^b | 86,3 ^a | 86,9 ^a | 88,7 ^a | 1,02 | 85,0 ^b | 89,5 ^a | 90,2 ^a | 92,0 ^a | 1,02 |

$n = 16$, pour chaque ligne, les moyennes auxquelles sont attribuées des indices différents sont significativement différentes entre elles ($P < 0,05$).

(1) granulation classique

(2) granulation par extrusion à haut débit

L'impact du traitement technologique sur la digestibilité réelle et les pertes endogènes spécifiques est présenté au tableau 4. La digestibilité réelle est toujours plus faible pour le régime « gros », elle augmente avec la diminution de la granulométrie. Néanmoins la détermination de la digestibilité réelle ne confirme pas les effets favorables mentionnés ci-dessus, du traitement de granulation à « haut débit ». Les régimes « gros » et « fin » entraînent les pertes endogènes spécifiques les plus importantes pour tous les acides aminés et l'N. On observe une tendance générale à la réduction des pertes endogènes par l'application du traitement de granulation « classique » qui devient statistiquement significative avec le traitement « granEHD ». L'impact des pertes endogènes sur la disponibilité vraie de l'azote est présenté à la figure 1. La disponibilité vraie de l'N présente des valeurs systématique-

ment inférieures à la digestibilité standardisée de l'N. L'écart entre ces deux coefficients est d'autant plus grand que les pertes endogènes sont plus élevées. La disponibilité vraie de l'N augmente de façon significative avec la diminution de la granulométrie. La granulation à haut débit du régime « fin » apporte une amélioration supplémentaire significative ($p < 0,05$).

3. DISCUSSION

L'effet favorable de la diminution de la granulométrie connu sur la digestibilité apparente ou standardisée de l'azote, des acides aminés et de l'énergie (GUILLOU et al., 2000 ; WONDRRA et al., 1995), est également observé dans cette étude. Nos résultats sont notamment en accord avec ceux de SAUER et al., (1977) et WÜNSCHE et al., (1987) qui

Tableau 4 - Impact technologique sur la Digestibilité Réelle et les pertes endogènes iléales spécifiques (% de l'N (AA) ingéré)

| Farine Granulation | Digestibilité Réelle | | | | | Pertes endogènes spécifiques | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|--|--------------------|--------------------|------|------------------------------|--|--------------------|-------------------|------|
| | grosse - | fine - class. ¹ EHD ² | | | SEM | grosse - | fine - class. ¹ EHD ² | | | SEM |
| N | 84,9 ^c | 88,8 ^{ab} | 87,5 ^b | 89,4 ^a | 0,50 | 10,8 ^b | 9,7 ^b | 8,9 ^b | 7,1 ^a | 0,72 |
| Acides aminés essentiels | | | | | | | | | | |
| Leucine | 85,1 ^c | 88,1 ^b | 88,4 ^{ab} | 89,9 ^a | 0,51 | 5,7 ^b | 5,4 ^b | 4,2 ^{ab} | 3,2 ^a | 0,64 |
| Isoleucine | 85,9 ^b | 89,3 ^a | 88,4 ^{ab} | 90,5 ^a | 0,95 | 6,6 ^{bc} | 7,3 ^c | 4,8 ^{ab} | 4,5 ^a | 0,61 |
| Valine | 84,9 ^b | 89,0 ^a | 89,1 ^a | 89,9 ^a | 0,88 | 8,7 ^b | 9,5 ^b | 7,9 ^{ab} | 5,8 ^a | 0,88 |
| Threonine* | 84,1 ^b | 90,3 ^a | 87,9 ^{ab} | 89,5 ^a | 1,07 | 15,5 ^b | 17,0 ^b | 14,1 ^{ab} | 10,5 ^a | 1,56 |
| Lysine* | 76,8 ^b | 84,5 ^a | 83,9 ^a | 83,5 ^a | 1,82 | 12,1 ^b | 13,2 ^b | 10,6 ^{ab} | 8,1 ^a | 1,25 |
| Acides aminés non-essentiels | | | | | | | | | | |
| Alanine | 80,9 ^b | 87,6 ^a | 87,3 ^a | 88,2 ^a | 0,81 | 12,9 ^c | 11,9 ^{bc} | 10,5 ^{ab} | 8,4 ^a | 0,70 |
| Glycine | 79,0 ^b | 83,1 ^a | 81,0 ^{ab} | 83,6 ^a | 0,91 | 10,6 ^b | 11,3 ^b | 9,6 ^{ab} | 6,7 ^a | 1,00 |
| Proline | 94,9 ^b | 99,1 ^a | 97,7 ^{ab} | 100,1 ^a | 1,07 | 9,9 | 9,6 | 7,5 | 8,2 | 1,17 |

n = 16, pour chaque ligne, les moyennes auxquelles sont attribuées des indices différents sont significativement différentes entre elles (P < 0,05).

(1) granulation classique

(2) granulation par extrusion à haut débit

() valeurs estimées comme décrit dans la partie discussion.*

montrent une amélioration de la digestibilité de l'N et des AA du blé avec la diminution de la taille moyenne des particules et ce au niveau iléal. L'augmentation de la surface des particules exposée aux attaques enzymatiques expliquerait pour une grande part cet effet. L'amidon des céréales est ainsi plus sensible à l'hydrolyse à mesure que la taille des particules diminue (CHAMP et al., 1993 ; SNOW et al., 1981). L'amélioration de la digestibilité des AA du blé peut aussi être associée à la rupture des grains d'aleurone, contribuant ainsi à la libération de leur contenu protéique (SAUNDERS et al., 1969). Néanmoins, tous ces auteurs expriment leurs résultats sous forme de digestibilité apparente ou standardisée. Dans ces cas, il est impossible de déterminer spécifiquement si la réduction de la taille des particules a eu un effet sur l'excrétion des protéines alimentaires, les pertes endogènes ou les deux. Nos résultats établissent que dans nos conditions expérimentales, la réduction de la taille moyenne des particules de 1000 µm à 500 µm n'a eu aucune incidence sur les pertes endogènes d'N ou d'AA mais a contribué à réduire les pertes de protéines alimentaires. Ceci est reflété par la seule augmentation de la digestibilité réelle suite au rebroyage. Dès lors, nous pouvons conclure que l'amélioration de la digestibilité apparente ou standardisée observée avec cette réduction de la granulométrie était seulement attribuable à une amélioration de l'accessibilité des protéines aux enzymes digestives. Des données similaires avaient auparavant été exposées pour le pois par HESS et al., (2000).

La granulation peut apporter des avantages technologiques tant au niveau de la manutention, du transport qu'au niveau de la sécurité sanitaire ou des performances de croissance (SKOCH et al., 1983). Dans le cadre de cette étude, nous n'avons observé aucun impact de la granulation dite « classique » sur les digestibilités de la MS, de l'azote ou de l'énergie. WONDRA et al., (1995) rapportaient néanmoins une hausse des coefficients de digestibilité pour la MS et l'N avec un procédé similaire sur un régime à base de maïs. Il est à noter que dans leur étude, les effets bénéfiques de la granulation étaient plus limités avec la farine de 400 µm qu'il ne l'était avec la farine grossière. Les effets de la granulation dite « classique » semblent limités lorsque les farines atteignent une taille de particule égale ou inférieure à 500 µm.

La technologie de granulation par extrusion à haut débit a quant à elle amélioré significativement les digestibilités de l'ensemble des nutriments du régime. Ces résultats sont en accord avec de précédents travaux impliquant cette technologie sur des céréales (AUMAITRE et al., 1975 ; ESSATARA et al., 1976 ; PIAO et al., 1999). Néanmoins, du fait de la grande diversité de paramètres et de matériels mis en jeu dans ce type de technologie, la comparaison des données de la littérature est souvent difficile. Cette technologie mettant en œuvre de fortes pressions et températures sur des temps très courts peut ainsi rompre les parois cellulaires ainsi que les structures comme les grains d'aleurone (SAUNDERS et al., 1969). Elle peut également

influencer la solubilité et la dégradation des composés fibreux (BJÖRCK et al., 1984). L'amélioration de la digestibilité de l'énergie peut ainsi être expliquée en partie par un effet de gélatinisation de l'amidon. Ce nutriment est alors plus accessible à la digestion enzymatique (JENSEN et al., 1965 ; THOMAS et al., 1996). Ces arguments peuvent également être avancés pour expliquer l'amélioration de digestibilité de l'azote obtenue avec ce procédé. Nous avons évalué l'impact de ce traitement sur les pertes endogènes et exogènes, afin de vérifier si le traitement a « réellement » amélioré la digestibilité. En fait, ni la granulation « classique », ni le traitement « granEHD » n'améliorent significativement la digestibilité réelle de l'N ou des AA. Ces augmentations observées pour les digestibilités apparentes et standardisées, doivent donc être attribuées à une réduction des pertes endogènes spécifiques. Malgré une tendance observée avec la granulation « classique », seul le traitement « granEHD » a présenté une augmentation de la digestibilité standardisée de l'N et des AA, avec une réduction des pertes endogènes. Les conditions de température et de pression associée à ce traitement sont probablement responsables de cet effet. Un effet identique avec un procédé similaire a été observé sur les pertes endogènes engendrées par du soja (MARTY et al., 1994). Il semblerait que ce procédé, augmentant le niveau de digestion par une moindre résistance des composés alimentaires, diminue ainsi les pertes endogènes.

La disponibilité est définie comme la proportion de l'N ou d'AA qui est digérée et absorbée sous une forme utilisable pour la synthèse protéique (BATTERHAM, 1992). Les pertes exogènes ou endogènes n'affectent pas de la même façon la disponibilité. En effet, une part des acides aminés absorbés peut être recyclée dans les tissus sécréteurs (LETERME et al., 1996). Ce processus provoque donc une perte « additionnelle » d'N ou d'AA qui va diminuer d'autant la disponibilité de l'acide aminé limitant. Ceci a clairement été vérifié sur les animaux étudiés, par la diminution linéaire de la rétention protéique avec l'augmentation des pertes endogènes (figure 2). En se référant au modèle présenté dans la partie matériels et méthodes, on constate que le coût total de la perte endogène Ne/Ke est supérieur à la perte endogène elle-même (Ne). Ceci est en effet condi-

tionné par le rendement de synthèse des sécrétions endogènes (ke) qui est dans ce cas de figure inférieur à 1 (soit $1/ke > 1$). La différence $(Ne/Ke) - Ne = Ne(1/Ke - 1)$ représente ainsi le coût métabolique associé aux pertes endogènes. Cette quantité constitue la différence entre disponible vrai et digestible standardisé. Les effets du traitement « granEHD » sont plus marqués par l'expression de la disponibilité de l'N que par celle de la digestibilité standardisée en conséquence directe de l'existence de ce coût métabolique (figure 1). Dans l'aliment étudié, la lysine et la thréonine étaient co-limitants. Néanmoins, la technique de marquage par perfusion de leucine ^{15}N mise en œuvre dans ce cas ne permettait pas d'étudier directement ces AA, seuls la leucine et les acides aminés en dérivant par transamination pouvant être directement caractérisés. Afin d'appliquer à ces AA, le modèle décrit plus haut, leurs pertes endogènes ont été estimées à partir de leur rapport à celles de la valine dans les digesta obtenus avec le régime protéoprive. Leur rétention corporelle a été évaluée grâce au profil établi précédemment par SAWADOGO, (1997). Les résultats sont présentés au tableau 5. Ces calculs concordent pour ces deux acides aminés, avec les résultats d'amélioration de la disponibilité obtenus suite au traitement « granEHD ». La lysine et la thréonine présentent différentes valeurs de Ke et Kb . L'origine artérielle ou luminale de ces AA peut expliquer ces

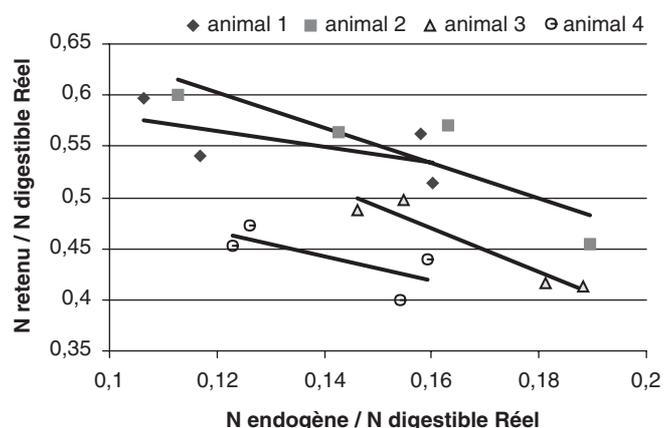


Figure 2 - Impact des pertes endogènes sur la rétention protéique

Tableau 5 - Impact technologique sur la Disponibilité Vraie

| Farine Granulation | Disponibilité Vraie | | | | Rendements Ke et Kb | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------------|------|------|------|------|
| | grosse | - | fine class. ¹ | EHD ² | SEM | Ke | SEM | Kb | SEM |
| N | 54,9 ^c | 61,9 ^b | 62,8 ^b | 69,7 ^a | 2,05 | 0,33 | 0,08 | 0,95 | 0,12 |
| Thréonine* | 55,9 ^c | 59,4 ^b | 62,2 ^b | 70,3 ^a | 2,18 | 0,55 | 0,13 | 0,74 | 0,10 |
| Lysine* | 40,0 ^c | 44,2 ^b | 50,6 ^{ab} | 58,9 ^a | 3,06 | 0,36 | 0,06 | 0,86 | 0,10 |

Pour chaque ligne, les moyennes auxquelles sont attribuées des indices différents sont significativement différentes entre elles ($P < 0,05$).

(1) granulation classique

(2) granulation par extrusion à haut débit

(*) valeurs estimées comme décrit dans la partie discussion.

différences. En effet, une grande partie de la lysine endogène doit provenir des sécrétions pancréatiques dont le pool précurseur est le sang artériel. En revanche, la thréonine endogène devrait elle provenir plus de la lumière intestinale pour supporter la synthèse des mucines (STOLL et al., 1997). Le coût métabolique plus faible de la thréonine serait alors expliqué par l'absence d'activité de thréonine déshydrogénase dans la muqueuse (LE FLOC'H et al., 1997). Le rendement de rétention protéique Kb est plus élevé pour la lysine que pour la thréonine. Ceci est conforme à la différence de rendement entre ces deux AA pour le dépôt corporel, sur la base des études sur la protéine idéale (SÈVE et HENRY, 1996).

CONCLUSION

Nos résultats mettent en évidence une variation des pertes endogènes spécifiques et de digestibilité réelle d'un régime

en fonction des traitements technologiques qu'il subit. La diminution de la taille des particules améliore la digestibilité réelle du mélange. La granulation à haut débit diminue les pertes endogènes spécifiques des acides aminés étudiés. La diminution des pertes exogènes et endogènes s'accompagne d'une augmentation de la disponibilité que l'expression par le critère de digestibilité standardisée n'est pas à même de retraduire.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le soutien financier de la société Cargill. Nos remerciements vont aussi au Dr Johannes VAN EYS pour l'initiative de ce projet, à Vincent HESS et à Jean-Pierre MELCION pour leurs nombreux conseils prodigués au cours de la réalisation de ce travail ainsi qu'à la société Degussa pour les analyses d'acides aminés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUMAITRE A., DUMOND R., 1975. Journées Rech. Porcine en France, 151-160.
- BATTERHAM E.S., 1992. Nutr. Res. Rev., 5, 1-18.
- BJÖRCK I., NYMAN M., ASP N.G., 1984. Cereal Chemistry, 61, 174-179.
- CHAMP M., COLONNA P., 1993. INRA Prod. Anim., 6, 185-198.
- DE LANGE C.F.M., SOUFFRANT W.B., SAUER W.C., 1990. J. Anim. Sci., 68, 409-418.
- ESSATARA M., DE SAINTAURIN M.A., ABRAHAM J., 1976. Ann. Zootech., 25, 31-39.
- GUILLOU D., LANDEAU E., 2000. INRA Prod. Anim., 13, 137-145.
- HESS V., SÈVE B., LANGER S., DUC G., 2000. Journées Rech. Porcine en France, 32, 207-215.
- HESS V., THIBAUT J.N., SÈVE B., 1998. J. Nutr., 128, 1969-1977.
- JENSEN A.H., BECKER D.E., 1965. J. Anim. Sci., 24, 392-397.
- LAPLACE J.P., DARCY-VRILLON B., PÉREZ J.M., HENRY Y., GIGER S., SAUVANT D., 1989. Brit. J. Nutr., 61, 75-87.
- LE FLOC'H N., THIBAUT J.N., SÈVE B., 1997. Brit. J. Nutr., 77, 593-603.
- LETERME P., THÉWIS A., FRANÇOIS E., VAN LEEUWEN P., WATHELET B., HUISMAN J., 1996. J. Nutr., 126, 2188-2198.
- MARTY B.J., CHAVEZ E.R., DE LANGE C.F.M., 1994. J. Anim. Sci., 72, 2029-2037.
- PIAO X.S., CHAE B.J., KIM J.H., JIN J., CHO W.T., 1999. Asian-Aus. J. Anim. Sci., 12, 783-787.
- SAS, 1989. SAS User's guide statistics.
- SAUER W.C., STOTHERS S.C., PHILLIPS G.D., 1977. Can. J. Anim. Sci., 57, 585-597.
- SAUNDERS R.M., WALKER H.G.Jr., KOHLER G.O., 1969. poul. Sci., 48, 1497-1503.
- SAWADOGO M.L., 1997. Thèse, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France, 150 p.
- SÈVE B., 1994. INRA Prod. Anim., 7, 275-291.
- SÈVE B., HENRY Y., 1996. In VII symposium on protein metabolism and animal nutrition. Vale de Santarém (POR), Estação zootécnica nacional (Ed), EAAP publ. 81, 59-82.
- SÈVE B., HESS V., 2000. In «Recent Advances in Animal Nutrition». GARNSWORTHY P.C., WISEMAN J., Nottingham University Press, Nottingham (UK), 167-181.
- SKOCH E.R., BINDER S.F., DEYO C.W., ALLEE G.L., BEHNKE K.C., 1983. J. Anim. Sci., 57, 929-935.
- SNOW P., O'DEA K., 1981. Am. J. Clin. Nutr., 34, 2721-2727.
- SOUFFRANT W.B., DARCY-VRILLON B., CORRING T., LAPLACE J.P., KÖHLER R., GEBHARDT G., RÉRAT A., 1986. Arch. Anim. Nutr., 36, 269-274.
- STOLL B., HENRY J., REEDS P.J., YU H., JAHOR F., BURRIN D.G., 1997. J. Nutr., 128, 606-614.
- THOMAS M., VAN DER POEL A.F.B., 1996. Anim. Feed Sci. Technol., 61, 89-112.
- WONDRA K.J., HANCOCK J.D., BEHNKE K.C., HINES R.H., STARK C.R., 1995. J. Anim. Sci., 73, 757-763.
- WÜNSCHE J., HERRMANN U., MEINL M., HENNIG U., KREIENBRING F., ZWIERZ P., 1987. Arch. Anim. Nutr., 37, 745-764.