HAL
open science

Contrôler les formes soufrées présentes dans les lisiers de porcs en utilisant l'approche alimentaire

P. Peu, Jean-Yves Dourmad, S. Picard, P. Dabert

To cite this version:

P. Peu, Jean-Yves Dourmad, S. Picard, P. Dabert. Contrôler les formes soufrées présentes dans les lisiers de porcs en utilisant l'approche alimentaire. 44e Journées de la Recherche Porcine, Feb 2012, Paris, France. p. 127 - p. 132. hal-00682835

HAL Id: hal-00682835

https://hal.science/hal-00682835

Submitted on 27 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

2012. Journées Recherche Porcine, 44, 127-132.

Contrôler les formes soufrées présentes dans les lisiers de porcs en utilisant l'approche alimentaire

Pascal PEU (1,2), Jean-Yves DOURMAD (3,4), Sylvie PICARD (1,2), Patrick DABERT (1,2)

(1) Cemagref, Unité de Gestion Environnementale et traitement biologique des déchets,
17, avenue de Cucillé, CS 64427, F-35044 Rennes cedex
(2) Université Européenne de Bretagne
(3) INRA, UMR 1079 Systèmes d'Élevage Nutrition Animale et Humaine, F-35590 Saint Gilles
(4) AGROCAMPUS OUEST, UMR 1079 Systèmes d'Élevage Nutrition Animale et Humaine, F- 35000 Rennes, France

pascal.peu@cemagref.fr

Avec la collaboration technique de Georges GUILLEMOIS (3), Francis LE GOUEVEC (3) et Régis JANVIER (3)

Contrôler les formes soufrées présentes dans les lisiers de porcs en utilisant l'approche alimentaire

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact de la teneur en soufre de l'aliment sur sa rétention et son excrétion par les porcs. Les teneurs en soufre de 76 matières premières ont été évaluées à partir des tables INRA-AFZ. La teneur en soufre total varie largement, entre 0,8 et 15,3 g S/kg de matière sèche. Pour la majorité des ingrédients, le soufre contenu dans les protéines explique l'essentiel du soufre total. Cependant, certains ingrédients sont riches en soufre minéral notamment les sous-produits issus de transformations industrielles. Une expérience in vivo a été réalisée sur des porcs mâles castrés logés individuellement dans des cages métaboliques de façon à collecter les excrétas. Onze régimes expérimentaux ont été comparés. Ces régimes différaient par leur teneur en protéines, le remplacement partiel des tourteaux de soja et de blé par des drêches de blé, pulpes de betteraves ou tourteaux de colza. L'apport de soufre des aliments testés variait entre 3,1 et 8,3 g S/porc/j. La rétention du soufre par les animaux était indépendante des régimes et s'élevait à 1,1 g S/porc/j en moyenne. A l'inverse, l'excrétion variait fortement selon les régimes entre de 1,5 à 6,9 g S/porc/j. La digestibilité du soufre était en moyenne de 79% et l'excrétion urinaire représentait 55% de l'ingestion. Avec 73% du total, l'excrétion urinaire constitue la principale voie d'excrétion du soufre. Quel que soit le régime alimentaire, les sulfates représentent 90% de l'excrétion totale de S, 100% dans l'urine et 50% dans les fèces. Les résultats de cette étude indiquent que la composition des régimes alimentaires peut avoir une influence marquée sur le niveau d'excrétion du soufre par les animaux, avec un effet spécifique de certaines matières premières riches en S inorganique.

Investigating sulphur content in pig slurry using a nutritional approach

The objective of this study was to determine the effect of sulphur feed content on sulphur retention and excretion by pig. The sulphur content of 76 different feedstuffs commonly used to formulate pig diets was evaluated from INRA-AFZ database. Total sulphur content varied between 0.5 and 15.3 g S/kg dry matter. For most of the feedstuffs, protein sulphur contributed to most of the sulphur content. However, inorganic sulphur was also found at a high level in some feedstuffs, especially in by-products from industrial process. In vivo experiments were conducted on fattening pigs individually housed in metabolic cages for collection of excreta. Eleven experimental diets, mainly based on wheat and on soybean meal, were compared. They differed by their protein content and the incorporation of feedstuffs with different total sulphur content (wheat, dried distiller's grains with solubles, sugar beet pulp or rapeseed meal). Sulphur supply varied between 3.1 and 8.3 g S/pig/day. Sulphur retention by animals was not affected by the diet and amounted to 1.1 g S/pig/day on average. Sulphur excretion was highly affected by the diet and varied from 1.5 to 6.9 g/pig/day. Sulphur digestibility was 79% on average and urinary sulphur excretion represented 55% of intake. Sulphur was excreted as 100% sulphate speciation form in urine, 50% in faeces and 90% in slurry. The results from this study indicate the feed composition may have a marked effect on sulphur excretion, with a specific contribution of some feedstuffs with high inorganic sulphur content.

INTRODUCTION

Dans les configurations actuelles de gestion des effluents d'élevage porcins, le lisier est collecté sous le bâtiment d'élevage puis entreposé dans une fosse de stockage avant d'être épandu sur les terres agricoles.
Au cours de son stockage en conditions anaérobies, le lisier peut accumuler et émettre des gaz tels que des composés organiques volatils qui peuvent être transférés de la phase liquide vers la phase gazeuse (Hartung et Phillips, 1994). Concernant les composés soufrés produits au cours du stockage anaérobie des effluents, certains sont préoccupants, notamment ceux responsables des odeurs.
D'après Spoelstra (1980), les composés soufrés majeurs responsables d'odeurs sont l'hydrogène sulfuré et les méthylmercaptans.
D'autres auteurs (Clanton et Schmidt, 2000) élargissent cette liste en y incluant le diméthylsulfure, le dimethyldisulfure, le disulfure de carbone et le carbonyl sulfure. Tous ces composés ont des seuils de détection olfactifs faibles. Le plus dangereux d'entre eux est certainement l'hydrogène sulfuré (H_2S) car il est toxique, non odorant à forte concentration et létal. Le plus souvent, le risque d'exposition maximale au H_2S survient lorsque le lisier est agité avant sa reprise pour son transfert et son épandage (Ni *et al.*, 2009 ; Oesterhelweg, Puschel, 2008).
La toxicité aiguë du H_2S, absorbé par inhalation, est bien documentée (Bonnard *et al.*, 2009). Des seuils de toxicité au sulfure d'hydrogène ont été définis afin de protéger les populations exposées.
Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a encore été réalisée sur les expositions prolongées à de faibles doses et sur leur répercussion sur la santé humaine, notamment dans le secteur agricole.
L'hydrogène sulfuré peut provenir de plusieurs sources :

(i) Les sulfates (SO_4^{2-}), en conditions anaérobies, peuvent être réduits par les bactéries sulfato-réductrices pour produire du H_2S. Ces bactéries réduisent le sulfate en sulfite puis en sulfure, forme dissoute de l'hydrogène sulfuré.
Ces micro-organismes sont des dégradeurs terminaux de la matière organique. Ils sont présents dans un grand nombre d'écosystèmes anaérobies tel que le lisier de porcs (Cook *et al.*, 2008).

(ii) Le soufre des acides aminés soufrés peut être réduit par fermentation bactérienne en H_2S et en pyruvate (Mackie *et al.*, 1998).

(iii) D'autres sources potentielles de H_2S sont aussi décrites (thiosulfate, sulfite, etc.) mais peuvent être considérées comme marginales dans le cas des lisiers de porcs.

Dans la bibliographie, plusieurs articles montrent l'existence d'une corrélation entre les odeurs émises par les lisiers de porcs et les émissions de composés soufrés (Le *et al.*, 2007) mais très peu d'études se sont intéressées à la relation entre l'alimentation et l'excrétion de soufre (S) dans les fèces et l'urine.

Les objectifs de cette étude sont, d'une part, d'analyser la variabilité des teneurs en soufre des différentes matières premières généralement utilisées dans l'alimentation du porc et d'autre part, de déterminer les flux de rétention et d'excrétion de soufre pour plusieurs régimes à teneur variable en cet élément.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Caractéristiques des matières premières

Les caractéristiques analytiques de 76 matières premières utilisées pour la formulation des aliments ont été extraites de la base de données INRA-AFZ (2004).
Pour tous ces ingrédients, les informations concernant les teneurs en protéines, en acides aminés soufrés (méthionine et cystine) et en soufre total ont été utilisées.
A partir de ces données, les teneurs en azote total (N) ainsi que les teneurs en S sous forme d'acides aminés soufrés (S-AAS) de chaque ingrédient ont été calculées, comme suit :

N (g) = protéines brutes (g) / 6,25

S-AAS (g) = 32,1 x [[méthionine (g) / 149,2] + [cystine (g) x 2 / 240,3]]

avec 6,25 le ratio entre les teneurs en protéines brutes et en azote total, 32,1, 149,2 et 240,3 les masses molaires respectives du soufre, de la méthionine et la cystine et 2, le nombre d'atomes de S dans chaque molécule de cystine. Pour chaque ingrédient, deux ratios entre N et S ont été calculés, l'un prenant en compte les acides aminés soufrés (N:S-AAS) et l'autre prenant en compte le S total (N:S).

1.2. Essais sur animaux

Afin de préciser l'utilisation du S par le porc, des essais de digestibilité ont été réalisés à l'INRA de Saint-Gilles (UMR SENAH), selon un dispositif factoriel. Ces essais avaient initialement été mis en place pour tester la digestibilité de sous-produits de l'industrie des biocarburants. Les aliments ont été préparés sur la base de l'analyse des ingrédients, notamment par rapport à leur teneur en S total.
Onze régimes expérimentaux ont ainsi été préparés à partir d'un régime de base constitué principalement de blé et de tourteau de soja. Des drèches de blé, du tourteau de colza et des pulpes de betteraves ont été ajoutés en quantité variable en remplacement d'une fraction du blé et du tourteau de soja. Les caractéristiques des onze régimes mis en comparaison sont rapportées au tableau 1.

Chacun de ces régimes a été distribué à 4 ou 5 porcs males castrés de race (Piétrain x (Landrace x Large White)) pesant environ 50 kg de poids vif au début de l'essai. Les animaux ont été placés en cages de digestibilité afin de collecter de façon séparée les fèces et les urines. Les porcs ont été adaptés aux régimes alimentaires et à la cage métabolique pendant 10 jours avant de recueillir les excréments sur une période de 10 jours. Au cours de la période d'adaptation, la ration allouée aux animaux a été progressivement augmentée à 2,2 kg. Au cours de la période de collecte, les aliments, les matières fécales et les urines ont été prélevés quotidiennement, cumulés et stockés à 4 °C. À la fin de la période de collecte, les fèces et les urines ont été homogénéisés et échantillonnés.

1.3. Analyses physico-chimiques

1.3.1. *La matière sèche*

La teneur en matière sèche (MS) des aliments, des fèces et des urines a été obtenue en séchant les différents échantillons à l'étuve à 105°C jusqu'à obtention d'un poids constant. Pour les urines, 700 ml d'échantillon ont été séchés par ajouts successifs de 100 ml afin d'éviter les pertes liées à l'ébullition.

Tableau 1 - Composition des régimes et résultats d'analyses chimiques

Régimes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Composition(%)											
Blé	87,3	80,0	90,0	64,9	64,9	64,9	64,9	64,9	70,1	58,4	69,3
Tourteau de soja	10,0	16,5	6,6	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	6,5	19,0	7,7
Drèches de blé				25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	20,0		
Pulpes de betteraves										20,0	
Tourteau de colza											20,0
Phosphate bicalcique	0,7	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,3
Carbonate de calcium	1,1	1,8	1,9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,7	1,0	1,8
Sel	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Premix*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Analyses											
MS (%)	87,6	87,3	87,5	87,6	88,3	88,2	88,2	87,2	88,4	87,5	81,4
Cendres (%)	4,7	5,8	5,5	5,5	5,6	5,8	5,3	5,4	6,1	6,5	6,3
Protéines** (%)	14,0	16,5	13,0	17,5	19,0	17,9	18,4	17,9	16,5	16,5	16,5
S (g S/kg)	1,6	1,7	1,5	2,1	4,1	3,8	2,6	2,6	2,3	2,0	1,9
S-AAS** (g S/kg)	1,2	1,3	1,1	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,4	1,2	1,7
$S\text{-}SO_4^{2-}$ (g S/kg)	0,1	0,2	0,2	0,5	0,6	0,6	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2
N:S-SAA	18,3	19,6	18,4	18,0	19,5	18,4	18,9	18,4	18,3	21,3	15,7
N:S	13,7	15,7	13,4	13,6	7,4	7,6	11,4	11,1	11,3	13,3	13,9

* Par kilogramme d'aliment: vitamine A, 10,000 IU; vitamine D 3 , 2,000 IU; vitamine E, 20 mg; vitamine K 3 , 2 mg; thiamine, 2 mg; riboflavine, 5 mg; niacine, 20 mg; pantothénique acide, 10 mg; pyridoxine, 5 mg; biotine, 0.2 mg; folique acide, 1 mg; vitamine B 12 , 0.03 mg; choline chloride, 600 mg; ascorbique acide, 40 mg; Fe, 100 mg; Cu, 20 mg; Zn, 100 mg; Mn, 40 mg; I, 0.6 mg; Se, 0.3 mg; and Co, 1 mg.
** Valeurs calculées obtenues avec les tables INRA-AFZ (2004)

1.3.2. *Le soufre total et protéique*

La teneur en soufre total a été déterminée par analyse élémentaire sur les échantillons préalablement séchés : aliments, fèces et urines. L'analyseur carbone-soufre SC-144DR (LECO) a été utilisé. Cet appareil est constitué consécutivement d'un four maintenu à 1350°C, d'un piège à eau et d'un détecteur infrarouge non dispersif. Un flux d'oxygène pur réglé à 3,5 l/min permet d'alimenter le four et d'entraîner les gaz produits vers le sécheur et le détecteur. Le soufre contenu dans l'échantillon est oxydé et se transforme en dioxyde de soufre. Les gaz de combustion sont ensuite analysés par une cellule infrarouge, notamment pour déterminer la concentration en dioxyde de soufre. L'appareil convertit ensuite ces résultats en teneur en soufre (% S) par calcul en tenant compte du poids de l'échantillon. La calibration est réalisée avec un étalon de charbon fourni par le fabricant. Les teneurs en soufre protéique des différents régimes testés ont été calculées grâce aux tables INRA-AFZ (2004).

1.3.3. *Les sulfates*

Les sulfates ont été caractérisés par colorimétrie. Les aliments et les fèces ont subi au préalable une extraction avec du KCl à 0,5 M ; 20 g d'échantillon ont été mélangés avec 230 ml de solution d'extraction puis agités pendant une heure.
L'extrait a ensuite été centrifugé, filtré et dilué avant analyse. Pour les urines, une simple dilution au centième a été réalisée. L'analyse a été réalisée en flux injecté sur l'appareil QuickChem 8000 de Lachat (USA). L'analyse repose sur la précipitation des sulfates par le chlorure de baryum et sur une détection colorimétrique à 420 nm.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Caractéristiques des matières premières

2.1.1. *Soufre total*

Les teneurs en soufre des différentes matières premières couramment utilisées pour formuler les rations porcines varient entre 0,8 et 15,3 g de soufre total par kg de matière sèche (Figure 1). Les plus basses concentrations en soufre sont obtenues pour les patates douces déshydratées et pour le groupe des matières premières regroupant les pulpes.
Les céréales et leurs sous-produits (gluten meal, sons, drèches, etc.) ont des teneurs moyennes en S de respectivement 1,4 g S/kg MS et de 2,1 g S/kg MS. Les fourrages déhydratés, les protéagineux et les oléagineux ont des concentrations plus élevées, proches de 2,5 g S/kg MS. Les tourteaux ont des valeurs moyennes encore plus élevées proches de 3.7 g S/kg MS, notamment pour le tourteau de colza, avec une teneur de 6,7 g S/kg MS. Pour les tourteaux, il est intéressant de noter que la teneur en soufre est plus élevée que celle des matières premières (oléagineux) qui ont servi à les produire.
Enfin les matières premières d'origine animale telles que les farines de poisson ou les sous-produits du lait, ont des teneurs en S plus élevées, comparativement à celles d'origine végétale. Marginalement, on notera que les effluents de levurerie ont les teneurs les plus élevées avec 15,3 g S/kg MS.

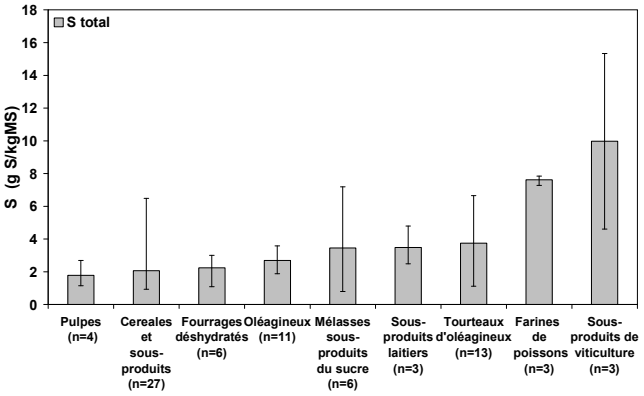

Figure 1 – Teneurs en soufre total de différents groupes de matières premières (INRA-AFZ, 2004) (Les barres affichent les valeurs minimales et maximales et n le nombre d'ingrédients)

Ces données obtenues après analyse de plusieurs milliers d'échantillons peuvent être comparées avec celles trouvées dans la littérature. Un article récent (Kerr *et al.*, 2008) qui recense les teneurs en S de différentes matières premières utilisées aux USA pour la formulation des rations porcines rapporte des valeurs similaires à celles des tables INRA-AFZ (2004). A titre d'exemple, pour le blé et le tourteau de soja, les teneurs mesurées aux Etats-Unis sont de respectivement 1,7 g et 4,6 g S/kg MS.

2.1.2. *Soufre protéique*

La figure 2 montre les rapports N:S-AAS et N:S des différentes catégories de matières premières. Globalement, le ratio N:S-AAS pour tous les ingrédients analysés dans les tables INRA-AFZ (2004) est assez stable avec une moyenne de 22,0 ± 2,9. Il reflète en fait la teneur en acides aminés soufrés des protéines. Le ratio N:S est quant à lui plus faible (13,1 ± 4,2) mais surtout beaucoup plus variable. Il est toujours inférieur au ratio N:S-AAS (P <0,001) pour tous les ingrédients analysés, ce qui indique que le soufre protéique (S-AAS) ne représente qu'une partie du S total (68% en moyenne). Cette différence indique aussi que, pour certains ingrédients, une part importante du S total est présent sous une autre forme que la forme protéique, principalement sous forme de S inorganique, tels que les sulfates, sulfites, etc. (Magee *et al.*, 2004). En comparant les ratios N:S-AAS et N:S on peut déterminer la charge de S minéral pour chaque ingrédient. Cinq groupes d'aliments présentent des différences marquées entre ces deux ratios : les mélasses et les sous-produits du sucre (72 % d'écart), les pulpes (71 % d'écart), les sous-produits laitiers (40% d'écart), les fourrages déshydratés (47 % d'écart) et les sous-produits du vin (26 % d'écart). On peut donc en conclure que de grandes quantités de soufre inorganique sont présentes dans ces ingrédients. Dans la plupart des cas, la présence de ce soufre est la conséquence du processus utilisé pour produire ces ingrédients (Kerr *et al.*, 2008). Pour la mélasse, l'amidon et ses sous-produits, de l'alcali est souvent utilisé dans le process et est ensuite neutralisé avec de l'acide sulfurique. De la même façon, pour la luzerne déshydratée, l'herbe, les produits dérivés du lait et du vin, les réactions (bio)chimiques sont tamponnées par l'addition d'acide sulfurique pour contrôler les variations de pH.

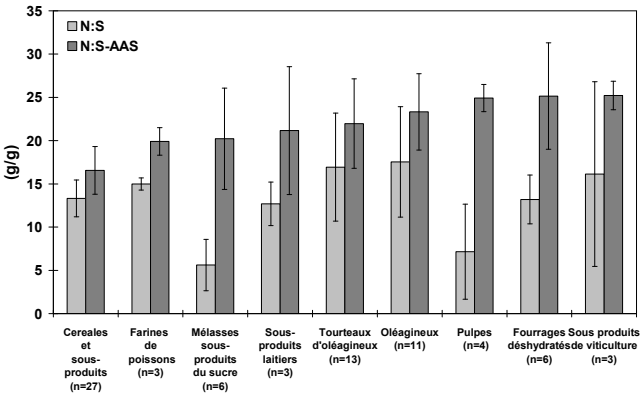

Figure 2 - Ratios N:S et N :S-AAS pour les différentes matières premières. (Les barres affichent les écarts-type et n le nombre d'ingrédients)

2.2. Détermination *in-vivo* de la rétention et de l'excrétion du soufre ingéré; spéciation du soufre excrété

2.2.1. *Caractérisation des régimes testés*

Le tableau 1 présente la caractérisation des formes soufrées trouvées dans les 11 régimes testés. Leur teneur en soufre total varie entre 1,5 et 4,1 g S/kg MS. Le régime 3 est le régime le moins concentré en S ; c'est un régime avec une faible teneur en protéines, basé sur un mélange de blé et de tourteau de soja, rééquilibré en acides aminés. Les régimes ayant les plus fortes teneurs en soufre sont ceux dans lesquels des drèches de blé ont été ajoutées. Cependant, malgré des niveaux d'incorporation en drèches de blé quasi-similaires (20-25%), les régimes 4 à 9 présentent des teneurs en soufre variables comprises entre 2,1 et 4,1 g S/kg MS. Les drèches de blé utilisées pour cette étude provenaient de différents fournisseurs qui utilisent différents procédés de fabrication, ce qui explique sûrement la forte variabilité des teneurs en soufre total mesurées. Malgré la forte variabilité des teneurs en S des régimes testés, les teneurs en soufre protéique sont plus proches, comprises entre 1,1 et 1,7 g S/kg MS. Les ratios N:S et N:S-AAS ont été calculés pour chacun des régimes. En moyenne le ratio N:S-AAS calculé pour les différents régimes est peu variable (18,6 ± 1,3 g/g). Par contre, le ratio N:S est plus variable avec des valeurs basses proches de 7 pour les régimes 5 et 6 et des valeurs plus élevées pour les autres régimes testés. Ces résultats mettent en évidence la présence importante de soufre sous forme non protéique, notamment pour les régimes 5 et 6. Cependant, la caractérisation des sulfates présents dans les régimes n'explique en moyenne que 13 % du soufre total contenu dans les régimes.

2.2.2. *Digestibilité du soufre*

Pour l'ensemble de cette étude, les animaux sont restés en bonne santé et aucun refus d'aliment ni gaspillage n'a été observé. Le gain moyen quotidien pendant la période de suivi s'élevait à 950 g/j et était peu affecté par les régimes testés.

La digestibilité apparente du S a été calculée par différence entre l'apport de S par l'aliment et l'excrétion de S dans les matières fécales. La figure 3 présente les résultats obtenus pour l'ensemble des régimes testés. L'augmentation de la quantité de S ingéré a entraîné une augmentation linéaire de la quantité de S absorbé. La digestibilité apparente du soufre a pu être déterminée pour l'ensemble des régimes; elle est relativement constante et s'élève en moyenne à environ 79% (± 4%) de l'apport. Des résultats similaires ont été rapportés par Eriksen *et al.* (2010) et Nørgaard *et al.* (2010), qui ont mesuré une digestibilité apparente du S de 84% pour des porcs en croissance ayant reçu des rations alimentaires complétées avec de l'acide benzoïque et de la méthionine.

2.2.3. *Excrétion et rétention du soufre*

La figure 4 présente le bilan moyen journalier du soufre retenu en fonction de l'ingéré. En moyenne, la quantité de S retenu (soit la différence entre l'apport et l'excrétion urinaire et fécale) s'élevait à 1,1 g S/porc/j (± 0,8). Elle ne différait pas entre les régimes. Des résultats similaires ont été rapportés par Eriksen *et al.* (2010) pour des porcs nourris avec différentes quantités de méthionine. Dans leur étude, la rétention du S s'élevait à 1,5 g S/porc/j. Cette rétention quasi constante et identique pour les différents régimes suggère que la consommation du S a été suffisante pour maximiser la rétention et que la fourniture du soufre protéique a dépassé les besoins nécessaires pour l'entretien et la croissance. Braude et Esnaola (1973) ont estimé que, pour avoir des performances zootechniques optimales chez le porc en croissance (20-60 kg de poids corporel), un minimum de 4,7 g/kg d'aliment en acides aminés soufrés doit être apporté (0,96 g S-AAS/kg). Selon le modèle InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008), l'exigence en acides aminés soufrés digestibles pour des

porcs en croissance diminue de 5,0 g/kg à 30 kg de poids vif, à 2,8 g/kg à 110 kg de poids vif. Sur la base de ces résultats, nous avons calculé que l'offre en acides aminés soufrés était légèrement inférieure au besoin pour les régimes 1, 2, 3 et 10, sans pour autant affecter de façon marquée le gain de poids des animaux.

La teneur en S de l'aliment affecte les quantités de S retrouvées dans les matières fécales et les urines. Tout le S ingéré qui excède la rétention est éliminé (R^2 = 0,72), quelle que soit la forme du S ingéré par les porcs.
En accord avec les résultats de Heger *et al.* (2008), la fourniture de soufre protéique au-delà des besoins des animaux est donc entièrement éliminée.

En moyenne, pour les régimes testés dans notre expérience, 55% (± 18%) de l'apport de S a été retrouvé dans les urines, alors que seulement 20% (± 5%) a été récupéré dans les fèces. L'urine constitue donc la voie principale d'excrétion du S avec 73% du total excrété.

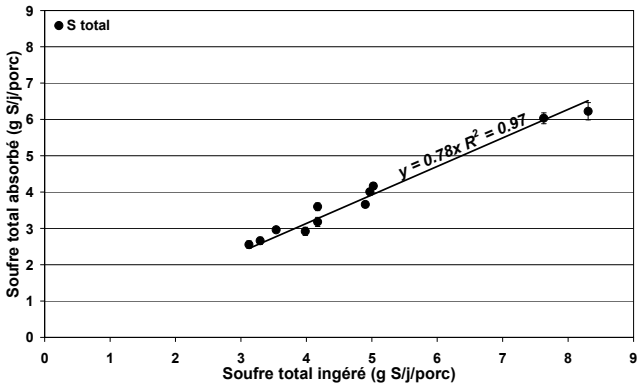

Figure 3 – Digestibilité apparente du soufre mesuré pour les 11 régimes testés

Les quantités de sulfates excrétés ont été déterminées en additionnant les sulfates retrouvés dans les fèces et dans les urines. Quel que soit le régime alimentaire, les sulfates représentent 90% (± 16%) de l'excrétion totale de S.
La spéciation de l'excrétion urinaire indique que les sulfates représentent la principale forme de S excrété (107% ± 27%), tandis que pour les fèces 50% (± 26%) du S était excrété sous forme de sulfate extractible. Pour les lisiers reconstitués, obtenus par le mélange des urines et des fèces dans les proportions excrétées, les teneurs en S total et en sulfates variait de 0,3 à 1,9 g S/kg, soit de 0,3 à 1,7 g S-SO_4^{2-}/kg, avec des valeurs extrêmes obtenues pour les régimes 1 et 6. Bien que le contenu en soufre protéique des régimes 1, 2, 3 et 10 fût proche du niveau minimal requis pour soutenir une croissance normale, le soufre total et les sulfates étaient présents en quantité significative dans les déjections (près de 0,5 g S/kg). La concentration en sulfates de l'eau fournie étant négligeable (10 mg S-SO_4^{2-}/l), nous pouvons donc conclure que les sulfates présents dans les lisiers de porcs provenaient principalement de l'alimentation.
Pour les régimes à faible teneur en protéines et rééquilibrés en acides aminés, une réduction supplémentaire de l'excrétion de S grâce à une diminution des apports de soufre protéique est difficilement envisageable sans affecter les performances des animaux.
Par ailleurs, pour les régimes à basse teneur en soufre, il semble difficile de réduire l'apport de S non organique car le S contenu dans ces régimes se trouve principalement sous forme protéique.

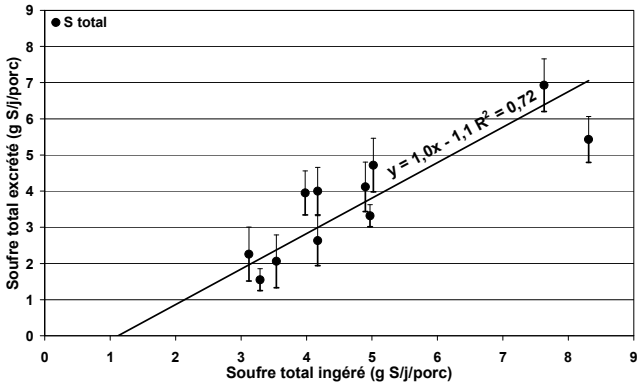

Figure 4 – Rétention et excrétion du soufré mesurées pour les 11 régimes testés

Des résultats similaires ont été obtenus par Clark *et al.* (2005) et Eriksen *et al.* (2010), qui ont également mesuré une augmentation de l'excrétion de S lorsque la teneur des aliments en acides aminés soufrés augmentait. Eriksen *et al.* (2010) ont mesuré une concentration en sulfate de 1 g S-SO_4^{2-}/kg dans un lisier issu de porcs recevant une alimentation enrichie en méthionine (10 g/kg).

CONCLUSION

La teneur en S des ingrédients influence celle des régimes alimentaires des porcs. Le S contenu dans les aliments est principalement présent sous forme organique (AAS) et, dans une moindre mesure, sous la forme de sels inorganiques. Chez le porc en croissance, la digestibilité apparente du S est d'environ 80%, le S étant principalement excrété sous forme de sulfates dans l'urine.

La composition des régimes alimentaires a donc une réelle influence sur le niveau d'excrétion du S par les animaux. Certains régimes conduisent à une excrétion minimale, notamment ceux à faible teneur en protéines et ne contenant pas d'ingrédients à forte teneur en S inorganique. Toutefois, bien que le S contenu dans ces régimes soit réduit au minimum nécessaire pour maintenir la croissance des porcs, des sulfates sont encore excrétés en quantité significative. Les régimes riches en protéines et/ou contenant des sous-produits ayant subi des traitements technologiques sont susceptibles de générer des effluents à forte teneur en S, ce qui peut conduire à des émissions accrues de H_2S en conditions anaérobies.

REMERCIEMENTS

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse cofinancée par l'ADEME.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bonnard N., Clavel T., Falcy M., Hesbert A., Jargot D., Reynier M., Schneider O., 2009. Sulfure d'hydrogène, Fiche toxicologique FT 32. INRS Eds, 8 p.
- Braude R., Esnaola M.A., 1973. Methionine + cystine requirements of growing pigs. Performance, nitrogen retention and carcass composition of growing pigs given semi purified diets supplemented with graded levels of DL methionine. Brit J Nutr, 30, 437-445.
- Clanton C.J., Schmidt D.R., 2000. Sulfur compounds in gases emitted from stored manure. Transactions of the Asae, 43, 1229-1239.
- Clark O.G., Morin B., Zhang Y.C., Sauer W.C., Feddes J.J.R., 2005. Preliminary investigation of air bubbling and dietary sulfur reduction to mitigate hydrogen sulfide and odor from swine waste. J Environ Qual, 34, 2018-2023.
- Cook K.L., Whitehead T.R., Spence C., Cotta M.A., 2008. Evaluation of the sulfate-reducing bacterial population associated with stored swine slurry. Anaerobe, 14, 172-180.
- Eriksen J., Adamsen A.P.S., Norgaard J.V., Poulsen H.D., Jensen B.B., Petersen S.O., 2010. Emissions of Sulfur-Containing Odorants, Ammonia, and Methane from Pig Slurry: Effects of Dietary Methionine and Benzoic Acid. J Environ Qual, 39, 1097-1107.
- Hartung J., Phillips V.R., 1994. Control of Gaseous Emissions From Livestock Buildings and Manure Stores. J. agri. Engng. Res., 57, 173-189.
- Heger J., Krizova L., Sustala M., Nitrayova S., Patras P., Hampel D., 2008. Individual response of growing pigs to sulphur amino acid intake. J Anim Physiol Anim Nutr, 92, 18-28.
- INRA-AFZ, 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage: porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. INRA Eds, Paris, France, 304 p.
- Kerr B.J., Ziemer C.J., Weber T.E., Trabue S.L., Bearson B.L., Shurson G.C., Whitney M.H., 2008. Comparative sulfur analysis using thermal combustion or inductively coupled plasma methodology and mineral composition of common livestock feedstuffs. J Anim Sci, 86, 2377-2384.
- Le P.D., Aarnink A.J.A., Jongbloed A.W., Van Der Peet Schwering C.M.C., Ogink N.W.M., Versiegen M.W.A., 2007. Effects of crystalline amino acid supplementation to the diet on odor from pig manure. J Anim Sci, 85, 791-801.
- Mackie R.I., Stroot P.G., Varel V.H., 1998. Biochemical identification and biological origin of key odor components in livestock waste. J Anim Sci, 76, 1331-1342.
- Magee E.A., Curno R., Edmond L.M., Cummings J.H., 2004. Contribution of dietary protein and inorganic sulfur to urinary sulfate: Toward a biomarker of inorganic sulfur intake. Am J Clin Nutr, 80, 137-142.
- Nørgaard J.V., Fernández J.A., Eriksen J., Olsen O.H., Carlson D., Poulsen H.D., 2010. Urine acidification and mineral metabolism in growing pigs fed diets supplemented with dietary methionine and benzoic acid. Livest Sci 134, 113-115.
- Oesterhelweg L., Puschel K., 2008. "Death may come on like a stroke of lightening ..." - Phenomenological and morphological aspects of fatalities caused by manure gas. Int J Legal Med, 122, 101-107.
- Spoelstra S.F., 1980. Origin of Objectionable Odorous Components in Piggery Wastes and the Possibility of Applying Indicator Components for Studying Odor Development. Agri Environ, 5, 241-260.
- van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.-Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. Anim Feed Sci Technol, 143, 387-405.