

# Quantification des bénéfices de la baisse de protéine sur les rejets azotés des porcs à l'engrais : approche par méta-analyse

Léa CAPPELAERE (1), Jaap VAN MILGEN (2), Kostas SYRIOPOULOS (1), Aude SIMONGIOVANNI (1), William LAMBERT (1)

(1) AJINOMOTO ANIMAL NUTRITION EUROPE, 32 rue Guersant, 75017 Paris, France

(2) UMR PEGASE, INRAe, Agrocampus Ouest, Domaine de la Prise, 35590 Saint Gilles, France

[lambert\\_william@eli.ajinomoto.com](mailto:lambert_william@eli.ajinomoto.com)

## Quantification des bénéfices de la baisse de protéine sur les rejets azotés des porcs à l'engrais : approche par méta-analyse

La baisse de la teneur en matières azotées totales (MAT) des rations est une solution reconnue pour réduire les rejets azotés des porcs à l'engrais, une problématique majeure en élevage porcin. L'impact de cette solution nutritionnelle est bien documenté mais il n'existe pas de synthèse quantitative de la littérature allant de l'excrétion azotée aux émissions d'ammoniac. Une méta-analyse a ainsi été menée pour quantifier les bénéfices de la baisse de MAT sur la balance azotée des porcs et les émissions d'ammoniac, et établir des équations de prédiction basées sur les performances animales. Les articles publiés entre 1990 et 2019 étudient l'effet de la baisse de MAT sur la balance azotée et/ou les émissions azotées des porcs à l'engrais (20-120 kg), avec des régimes formulés iso-Lys digestible. Au total, 30 articles ont été utilisés, correspondant à 43 essais et 126 traitements expérimentaux. La procédure de modèle linéaire général de MINITAB (2019) a été utilisée pour établir des modèles de régression incluant un effet fixe de l'essai. La baisse marginale d'un point de MAT dans l'aliment réduit linéairement l'excrétion azotée totale, l'excrétion azotée urinaire, l'excrétion azotée fécale et les émissions d'ammoniac de, respectivement, 8,2, 10, 3,2 et 10 % ( $P < 0,001$ ) et améliore le coefficient de rétention de 1,6 points. L'excrétion azotée urinaire, source principale des émissions d'ammoniac, est volatilisée à 28 % sous forme d'ammoniac ( $P < 0,001$ ). La part d'excrétion azotée sous forme urinaire est réduite de 0,9 point par point d'amélioration de l'efficacité azotée ( $P < 0,001$ ). Cette étude permet de mettre en évidence l'impact positif de la baisse de MAT sur les émissions azotées du porc à l'engrais et de quantifier ces bénéfices.

## Quantifying benefits of reducing dietary crude protein on nitrogen emissions of fattening pigs: a meta-analysis

Reducing dietary crude protein (CP) is a recognized solution for reducing nitrogen (N) emissions, which is a major issue for pig farming. The effect of this nutritional solution is well documented, but there is no quantitative summary in the literature that combines data on N excretion and ammonia emissions. A meta-analysis was performed to quantify benefits of reducing dietary CP on pig N balance and ammonia emissions, and to develop predictive equations based on animal performance. Articles included in the meta-analysis studied effects of CP reduction on N balance and/or N emissions of fattening pigs (20-120 kg), were published from 1990-2019 and used iso-digestible lysine diets. Thirty articles were used, which corresponded to 43 trials and 126 treatments. The general linear model procedure of MINITAB (2019) was used to build regression models, including a fixed trial effect. Reducing dietary CP linearly reduces total N excretion, urinary N excretion, fecal N excretion and ammonia emissions by 8.2%, 10%, 3.2% and 10%, respectively, per percentage point of CP reduction ( $P < 0.001$ ). Nitrogen efficiency is improved by 1.6 percentage points per percentage point of CP reduction. Furthermore, 28% of urinary N excretion, the main source of ammonia emissions, is volatilized as ammonia ( $P < 0.001$ ). The proportion of N excreted in urine is reduced by 0.9 percentage points per percentage point of improved N efficiency ( $P < 0.001$ ). This study highlighted positive impacts of reducing CP on N emissions from fattening pigs and then quantified them.

## INTRODUCTION

Pour limiter les impacts environnementaux de la production porcine, diverses réglementations ont été mises en place ; les principales sont la Directive Nitrates et la Directive Emissions Industrielles. Ce cadre réglementaire est accompagné d'une volonté des acteurs de la filière d'être plus respectueux de l'environnement et de réduire leurs émissions. L'azote contenu dans les effluents d'élevage est particulièrement ciblé puisqu'il est à l'origine d'émissions d'ammoniac et de nitrates, responsables en partie de pollution de l'air et de l'eau, d'eutrophisation des milieux aquatiques et d'acidification des sols.

La baisse de la teneur en matière azotée totale (MAT) des rations est une méthode reconnue et efficace pour réduire les rejets azotés des porcs à l'engrais et les impacts environnementaux associés. Cette stratégie nutritionnelle fait partie des Meilleures Techniques Disponibles (MTD) identifiée par la Commission Européenne (BREF IRPP, 2017) pour réduire les émissions des élevages porcins.

Cette technique et ses impacts sur les émissions azotées des élevages porcins sont bien documentés dans la littérature. Récemment, une revue de la littérature (Wang *et al.*, 2019) a évalué l'effet de la baisse de teneur en MAT sur l'excrétion azotée à partir de quelques essais récents. Sajeev *et al.* (2019) ont réalisé une méta-analyse se concentrant sur les émissions d'ammoniac en bâtiment ou au stockage d'effluents.

Le but de la méta-analyse présentée ici est de quantifier de manière robuste les effets de la baisse de teneur en MAT sur la balance azotée, la composition du lisier, son volume et les émissions d'ammoniac, en suivant notamment les recommandations de Sauvant *et al.* (2020). Elle permet également d'établir des équations de prédiction des émissions azotées en élevage porcin basées sur les performances de croissance.

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. Base de données et sélection des articles

Une base de données expérimentale sur la baisse de MAT chez le porc à l'engraissement a été utilisée. Elle est composée d'essais publiés entre 1990 et 2019, étudiant les effets de la baisse de teneur en MAT des rations sur des porcs de 20 à 110 kg et dont la composition des régimes expérimentaux était disponible. Pour cette méta-analyse, une sous-base contenant les publications étudiant la balance azotée des animaux, les caractéristiques du lisier ou les émissions gazeuses a été extraite. Elle se compose de 42 publications correspondant à 67 essais et 206 traitements.

Les valeurs nutritionnelles des aliments ont été recalculées à partir des tables INRA-AFZ (Savant *et al.*, 2004), en utilisant le logiciel Evapig.

Ces valeurs recalculées ont été utilisées pour sélectionner les essais où le niveau de lysine digestible était constant, avec une

marge de 5 %. L'apport des autres acides aminés n'a pas été contrôlé. Après sélection, une base de 30 articles, correspondant à 43 essais et 126 traitements a été utilisée pour la méta-analyse.

### 1.2. Analyse statistique

L'effet de la baisse de teneur en MAT sur les différentes variables a été quantifié, en valeurs absolue et relative. Le modèle linéaire général avec un effet du niveau de MAT et un effet fixe de l'essai a été utilisé sous le logiciel MINITAB (2019). L'interaction entre teneur en MAT et essai (effet de l'essai sur la pente) a aussi été testé dans les modèles et retenu quand significatif (excrétion azotée totale et urinaire, coefficient de rétention). Un effet quadratique de la teneur en MAT a été testé mais n'était significatif dans aucun des modèles. La valeur de MAT utilisée pour l'analyse statistique est celle publiée car elle est proche des valeurs recalculées (MAT recalculée = 0,12 + 0,996 x MAT publiée ;  $R^2 = 98,9\%$  ;  $P < 0,001$ ). La valeur de MAT analysée a été préférée à la valeur formulée quand elle était disponible. Pour les essais avec plusieurs phases d'alimentation, une valeur de MAT moyenne, pondérée par l'ingestion au cours de chaque phase, a été utilisée.

Le modèle linéaire général, incluant un effet fixe de l'essai, a aussi été appliqué pour élaborer des équations de prédiction des émissions azotées en fonction du gain, de l'ingéré et de l'indice de consommation.

## 2. RESULTATS

### 2.1. Méta-design

Les données utilisées sont issues de 43 essais. Vingt et un essais sont des essais courts (moins de 10 jours), en cage métabolique, avec l'individu comme unité statistique ; quatre essais sont des essais individuels en cage métabolique mais de longue durée (plus de 4 semaines) ; quatre essais ont été menés en groupe sur une période courte (une semaine) ; 14 essais ont été menés en groupe sur une durée supérieure à 3 semaines. Quinze essais ont testé deux niveaux de MAT, 11 trois niveaux de MAT et 17 quatre niveaux ou plus.

Vingt-cinq essais ont utilisé des animaux en croissance, 12 des animaux en finition et 6 essais couvrent la période totale croissance-finition. La génétique des porcs n'est pas précisée dans la plupart des essais et n'a donc pas été étudiée ici.

Seize essais ont utilisé une base maïs et 27 une base blé et/ou orge. La source de protéine était le tourteau de soja dans tous les essais sauf quatre essais ayant utilisé à la fois du tourteau de soja et de colza et un essai utilisant uniquement du tourteau de colza.

Les plages de variation des teneurs en MAT sont représentatives des niveaux standard pour les témoins et des stratégies basse teneur en MAT pour les traitements (Tableau 1). Les niveaux d'énergie et de lysine digestible apportés couvrent une large plage de valeurs, représentatives de la diversité des pratiques européennes.

**Tableau 1** – Caractéristiques nutritionnelles des aliments expérimentaux (valeurs recalculées sur table INRA-AFZ, 2004)

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
MAT - témoin (%)	14,00	20,95	17,53	2,17
MAT – minimum (%)	9,73	15,37	13,02	1,58
Baisse de MAT testée (%MAT)	1,79	8,68	4,51	1,67
Energie nette (EN, MJ/kg)	8,44	10,73	9,93	0,44
Lysine digestible (%)	0,61	1,15	0,81	0,12
Lysine digestible / EN (g/MJ)	0,58	1,21	0,82	0,12

**2.2. Quantification des effets de la baisse de protéine**

**2.2.1. Balance azotée**

Sous l'effet de la baisse de teneur en MAT, la consommation d'azote est réduite linéairement de 4,3 % par point de baisse de MAT ( $P < 0,001$ ). La rétention azotée n'est pas impactée par la baisse de protéine ( $P = 0,113$ ).

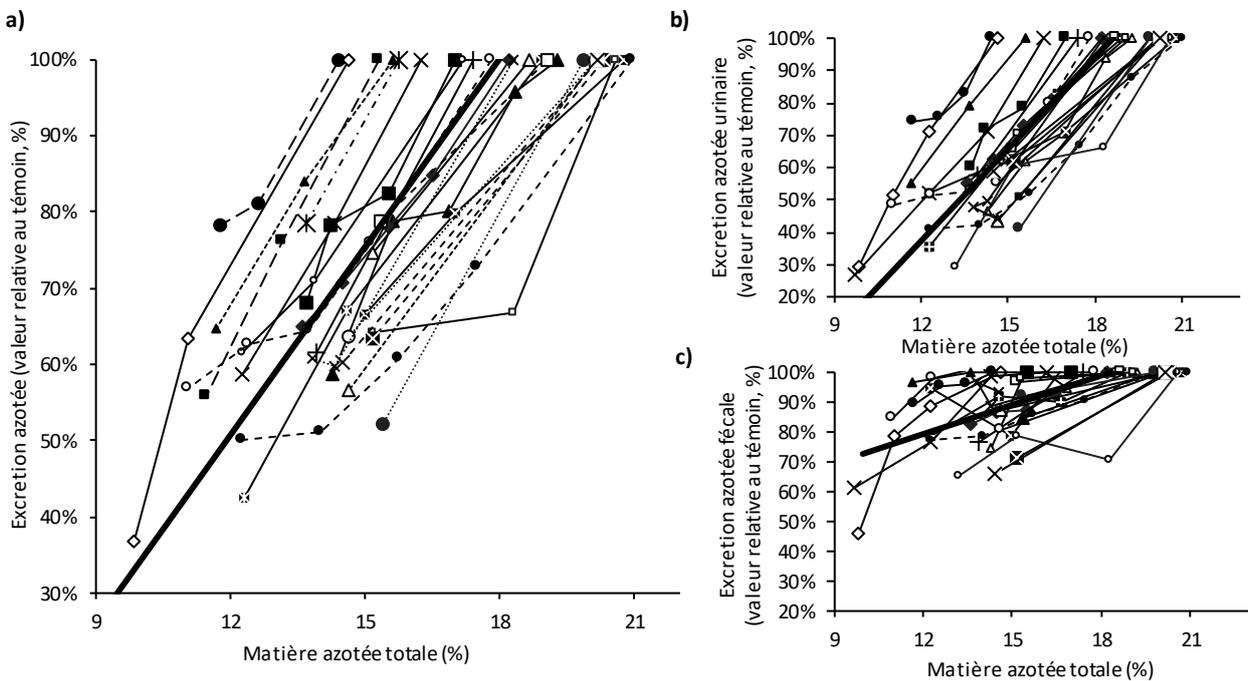
L'excrétion azotée totale du porc à l'engrais diminue linéairement de 2,2 g/j par point de baisse de MAT. Exprimée en pourcentage de l'excrétion azotée pour le régime témoin, cette réduction suit la relation suivante (Figure 1) :

**Excrétion azotée (%) =  $-47,7 + 8,2 \times \text{MAT} (\%)$  [équation 1]**  
 $N = 27 ; P < 0,001 ; R^2 \text{ ajusté} = 94,4 \%$

L'excrétion azotée est réduite de 8,2 % par point de MAT, sans plafonnement quand la teneur en MAT est très fortement réduite (effet quadratique de la teneur en MAT non significatif,

$P = 0,242$ ). Néanmoins, il existe une grande variabilité de cette pente entre essais : effet significatif de l'effet essai sur la pente ( $P = 0,007$ ) avec une plage de variation de la réduction entre 4,8 % et 12,7 % par point de baisse de MAT.

Logiquement, l'excrétion d'azote urinaire est plus fortement réduite que l'excrétion fécale : 10 % par point de baisse de MAT contre 3,1% respectivement ( $N = 21 ; P < 0,001$ ). En effet, l'excrétion fécale est peu affectée car la digestibilité des protéines varie peu avec la baisse de MAT. En revanche, le meilleur équilibre en acides aminés des aliments dont le taux de protéines a été réduit limite efficacement l'excès d'acides aminés qui seraient éliminés sous forme d'urée par les animaux. Ainsi, la proportion d'azote excrétée dans les urines diminue avec la baisse de teneur en MAT ( $P < 0,001$ ) : l'azote urinaire représente 75 % de l'excrétion azotée pour une MAT de 19 % mais 60 % pour une MAT de 13 %.



**Figure 1** – Excrétion azotée chez le porc à l'engrais en fonction de la teneur en matière azotée totale de l'aliment : (a) excrétion totale, (b) excrétion urinaire, (c) excrétion fécale

Sous l'effet de la baisse de l'ingéré protéique et de l'excrétion azotée, l'efficacité azotée des animaux est améliorée linéairement : +1,6 points par point de baisse de MAT ( $N = 26 ; P < 0,001$ ).

**2.2.2. Composition du lisier**

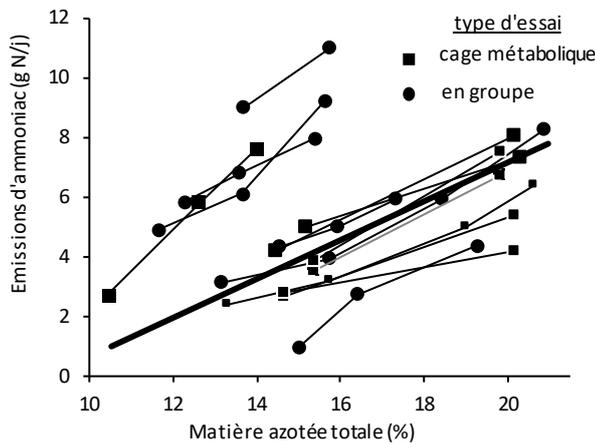
La baisse de l'excrétion azotée affecte la composition du lisier produit. La concentration en azote est réduite linéairement de 5 % par point de baisse de MAT ( $P < 0,001$ ). La concentration en azote ammoniacal, issu de la dégradation rapide de l'urée, est plus fortement réduite : -7 % par point de baisse de MAT ( $N = 11 ; P < 0,001 ; R^2 \text{ ajusté} = 71 \%$ ).

De plus, le lisier est plus acide avec des régimes à basse teneur en MAT, avec une baisse de pH de 0,15 point par point de réduction de MAT ( $P < 0,001$ ).

**2.2.3. Emissions d'ammoniac**

Grâce à la réduction de la concentration en azote ammoniacal du lisier et à la baisse de son pH, les émissions d'ammoniac sont réduites de 0,65 g N/j (0,84 g  $\text{NH}_3/\text{j}$ ) par point de baisse de MAT (Figure 2), soit une baisse de 10 % par point de baisse de MAT ( $N = 21 ; R^2 \text{ ajusté} = 93 \%$  ;  $P < 0,001$ ). La réduction des émissions d'ammoniac est donc plus importante que la réduction de l'excrétion azotée (10 % vs 8 %) et une plus grande part de l'azote excrété est retenue dans le lisier.

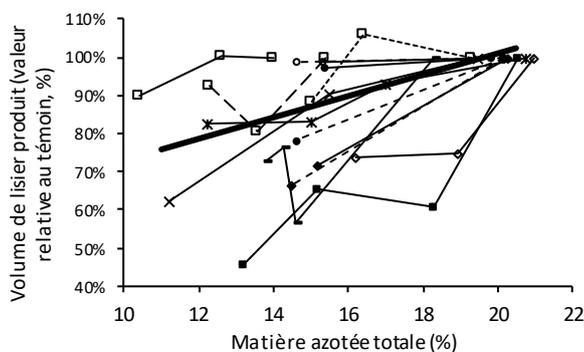
Sur les 21 essais ayant mesuré ce paramètre, 10 sont des essais en cages métaboliques et 11 des essais avec des animaux conduits en groupe dans des conditions plus proches de celles en élevages commerciaux. Le type d'essai dans lesquelles les émissions d'ammoniac sont mesurées n'a pas d'effet sur le niveau des émissions mesurées ( $P = 0,120$ ) ou sur leur réduction ( $P = 0,205$ ).



**Figure 2** – Emissions d’azote ammoniacal au bâtiment en fonction de la teneur en matière azotée totale de l’aliment

2.2.4. Volume de lisier

Le volume de lisier produit quotidiennement par un porc est réduit de 2,8 % par point de réduction de MAT (N = 15 ; P = 0,003 ; R<sup>2</sup> ajusté = 58 % ; Figure 3).



**Figure 3** – Volume de lisier produit par le porc à l’engrais en fonction de la teneur en matière azotée totale de l’aliment

La quantité de lisier produite est mieux estimée à partir de la consommation azotée des animaux, qui prend en compte le niveau d’ingestion des animaux ainsi que l’effet de la baisse de la teneur en MAT.

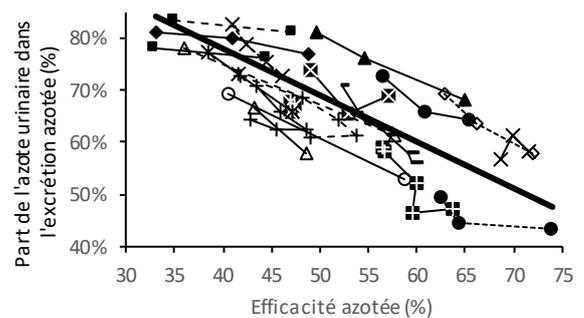
**Production de lisier (kg/j) =**  
**1,26 + 61,2 x N ingéré (kg N/j) [équation 2]**  
 N = 12 ; P < 0,001 ; R<sup>2</sup> ajusté = 96 %

2.3. Equations de prédiction : estimer les émissions d’ammoniac

Afin de pouvoir estimer les bénéfices de stratégies de baisse de protéine dans des contextes pratiques, des équations de prédiction ont été établies à partir de données de performances facilement accessibles.

La part réactive de l’azote contenu dans le lisier est issue de l’azote urinaire. La part d’azote excrétée par le porc sous forme urinaire peut être estimée à partir de son efficacité azotée (Figure 4) :

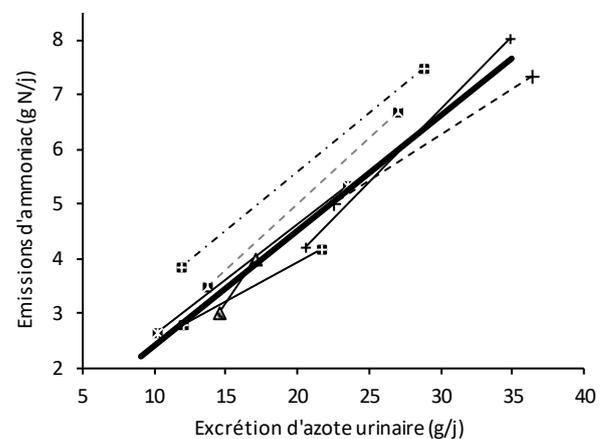
**Part d’azote urinaire dans l’azote excrété (%) =**  
**114 + 0,9 x Efficacité azotée (%) [équation 3]**  
 N = 27 ; P < 0,001 ; R<sup>2</sup> ajusté = 86 %



**Figure 4** – Part d’excrétion azotée sous forme urinaire en fonction de l’efficacité azotée du porc à l’engrais

Les émissions d’ammoniac au bâtiment peuvent être estimées de manière précise à partir de l’excrétion d’azote urinaire (Figure 5) :

**Emissions d’ammoniac (g N/j) =**  
**0,28 x Excrétion azotée urinaire (g N/j) [équation 4]**  
 N = 12 ; P < 0,001 ; R<sup>2</sup> ajusté = 93 %



**Figure 5** – Emissions d’azote ammoniacal en bâtiment en fonction de l’excrétion azotée urinaire du porc à l’engrais

3. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les résultats de cette méta-analyse rendent compte de l’intérêt de la baisse de teneur en MAT pour réduire l’excrétion azotée des porcs à l’engrais ainsi que les émissions d’ammoniac. La quantification rigoureuse de ces bénéfices est proche de celle rapportée dans des revues et méta-analyses récentes : Wang *et al.* (2018) ont rapporté une réduction de l’excrétion azotée comprise entre 8 et 10 % par point de baisse de MAT dans neuf essais récents, Sajeew *et al.* (2018) ont estimé la réduction d’émissions d’ammoniac à 11 % par point de baisse de MAT dans une méta-analyse basée sur 12 essais.

Les équations d’estimation des émissions d’ammoniac au bâtiment proposées dans cette méta-analyse sont plus précises que celles proposées par l’EMEP (EMEP, 2019), basées uniquement sur l’excrétion azotée avec une concentration du lisier en azote ammoniacal et un facteur d’émission fixe.

L'introduction de la variation de la composition du lisier avec la baisse de protéine permet une meilleure estimation de la volatilisation de l'azote. Ces équations donnent des résultats similaires avec des niveaux de MAT standards mais des émissions d'azote plus élevées quand la teneur en MAT est réduite. Le facteur d'émission de l'azote urinaire en ammoniac obtenu dans cette méta-analyse (28 %) est identique à celui de l'azote ammoniacal recommandé par l'EMEP. La mesure de l'excrétion azotée urinaire est donc bien une estimation fiable de la teneur en ammoniac du lisier. Cette méthode d'estimation est aussi plus simple que le modèle proposé par Rigolot *et al.* (2010), fréquemment utilisé en analyse de cycle de vie (ACV) et ne nécessite en entrée que des variables facilement accessibles sur le terrain.

La diminution du volume de lisier produit avec la baisse de teneur en MAT est liée à la réduction de la consommation et de l'excrétion d'eau (Pfiesser *et al.*, 1995). Cette relation n'a pas été mise en évidence dans cette méta-analyse car la consommation d'eau est un facteur peu mesuré (cinq essais). Carpenter *et al.* (2004) a montré une diminution de la consommation d'eau de 11 % pour 5 points de baisse de MAT, liée à une inclusion plus faible de tourteaux de soja riches en potassium et à une excrétion plus faible d'azote sous forme d'urée. Le volume urinaire est donc également réduit : -23 % pour 5 points de baisse de MAT (Carpenter *et al.*, 2004).

Les essais de baisse de la teneur en MAT étudiant les effets sur l'excrétion azotée et ses conséquences contrôlent moins les niveaux en acides aminés que les essais portant sur la performance. Afin de garder une base de données suffisamment large et de pouvoir réaliser des analyses

statistiques, la sélection des essais s'est arrêtée à l'apport en lysine digestible. Les niveaux des autres acides aminés n'étant pas toujours contrôlés, la performance des animaux est partiellement impactée par la baisse de protéine : la consommation moyenne quotidienne augmente ( $P = 0,020$ ) et le gain moyen quotidien est stable ( $P = 0,113$ ). Ces résultats sont cependant à nuancer car la majorité des essais étudiés dans cette méta-analyse sont des essais courts (une semaine) et/ou avec l'individu comme unité expérimentale.

Un bon apport en acides aminés est important pour maintenir les performances des porcs à l'engrais et garantir une utilisation efficace de l'azote (Zhao *et al.*, 2019). Cette méta-analyse ayant uniquement contrôlé l'apport en lysine, la quantification des bénéfices de la baisse de MAT est sous-estimée par rapport à des régimes avec un profil en acides aminés équilibré.

Cette étude s'est arrêtée aux émissions d'ammoniac en bâtiment car peu de données sont aujourd'hui disponibles sur les émissions pendant le stockage des effluents et après l'épandage. Pour avoir une vision complète des bénéfices des stratégies de baisse de teneur en MAT, ces étapes devraient être intégrées dans les études. Il serait aussi intéressant de mieux quantifier les émissions d'oxyde nitreux ( $N_2O$ ), puissant gaz à effet de serre, ainsi que les pertes de nitrates par lessivage afin de pouvoir inclure ces effets de la baisse de teneur en MAT dans des calculs complets d'ACV.

Cette étude a montré que la baisse de teneur en MAT améliore la rétention de l'azote organique dans le lisier, permettant une meilleure fermeture des cycles biogéochimiques et une meilleure valorisation sous forme d'engrais organique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ball M.E.E., Magowan E., McCracken K.J., Beattie V.E., Bradford R., Gordon F.J., Robinson M.J., Smyth S., Henry W., 2013. The effect of level of crude protein and available lysine on finishing pig performance, nitrogen balance and nutrient digestibility. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 26, 564-572.
- BREF IRPP, 2017. Best Available Techniques (BAT) reference document for the intensive rearing of poultry or pigs.
- Canh T.T., Aarnink A.J.A., Schutte J.B., Sutton A., Langhout D.J., Verstegen M.W.A., 1998. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs. *Livestock Production Science*, 56, 181-191.
- Carpenter D.A., O'Mara F.P., O'Doherty J.V., 2004. The Effect of Dietary Crude Protein Concentration on Growth Performance, Carcass Composition and Nitrogen Excretion in Entire Grower-Finisher Pigs. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 43, 227-236.
- Clark O.G., Moehn S., Edeogu I., Price J., Leonard J., 2005. Manipulation of Dietary Protein and Nonstarch Polysaccharide to Control Swine Manure Emissions. *Journal of Environmental Quality*, 34, 1461-1466.
- Deng D., Huang R.L., Li T.J., Wu G.Y., Xie M.Y., Tang Z.R., Kang P., Zhang Y.M., Fan M.Z., Kong X.F., Ruan Z., Xiong H., Deng Z.Y., Yin Y.L., 2007. Nitrogen balance in barrows fed low-protein diets supplemented with essential amino acids. *Livestock Science*, 109, 220-223.
- EMEP, 2019. EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook 2019, 3.B Manure management, 62p.
- Hansen M.J., Nørgaard J.V., Adamsen A.P.S., Poulsen H.D., 2014. Effect of reduced crude protein on ammonia, methane, and chemical odorants emitted from pig houses. *Livestock Science*, 169, 118-124.
- Hayes E.T., Leek A.B.G., Curran T.P., Dodd V.A., Carton O.T., Beattie V.E., O'Doherty J.V., 2004. The influence of diet crude protein level on odour and ammonia emissions from finishing pig houses. *Bioresource Technology*, 91, 309-315.
- Heger J., Mengesha S., Blaha J., Koch F., 1997. Estimation of minimum crude protein levels in diets for high-lean growth pigs. *Agribiological research (Germany)*, 50, 64-77.
- Kendall D., Lemenager K., Richert B., Sutton A., Frank J., Belstra B., Bundy D., 1998. Effects of intact protein diets versus reduced crude protein diets supplemented with synthetic amino acids on pig performance and ammonia levels in swine buildings. *J. Anim. Sci.*, 76, 173.
- Le P.D., Aarnink A.J.A., Jongbloed A.W., van der Peet-Schwering C.M.C., Ogink N.W.M., Verstegen M.W.A., 2008. Interactive effects of dietary crude protein and fermentable carbohydrate levels on odour from pig manure. *Livestock Science*, 114, 48-61.
- Le P.D., Aarnink A.J.A., Jongbloed A.W., 2009. Odour and ammonia emission from pig manure as affected by dietary crude protein level. *Livestock Science*, 121, 267-274.
- Le Bellego L., van Milgen J., Dubois S., Noblet J., 2001. Energy utilization of low-protein diets in growing pigs. *Journal of Animal Science*, 79, 1259-1271.
- Lee J., Kim J., Kim J., Kim I., Han K., 2001. Effect of different dietary cp levels on the growth, nutrient utilization and carcass characteristics of finishing barrows and gilts reared in phase feeding regimen. *Journal of Applied Animal Research*, 19, 145-163.
- Leek A.B.G., Callan J.J., Henry R.W., O'Doherty J.V., 2005. The Application of Low Crude Protein Wheat-Soyabean Diets to Growing and Finishing Pigs: 2. The Effects on Nutrient Digestibility, Nitrogen Excretion, Faecal Volatile Fatty Acid Concentration and Ammonia Emission from Boars. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 44, 247-260.

- Lynch B., Callan J.J., O'Doherty J.V., 2009. The interaction between dietary crude protein and fermentable carbohydrate source on piglet post weaning performance, diet digestibility and selected faecal microbial populations and volatile fatty acid concentration. *Livestock Science*, 124, 93-100.
- Lynch M.B., O'Shea C.J., Sweeney T., Callan J.J., O'Doherty J.V., 2008. Effect of crude protein concentration and sugar-beet pulp on nutrient digestibility, nitrogen excretion, intestinal fermentation and manure ammonia and odour emissions from finisher pigs. *animal*, 2, 425-434.
- Nørgaard J.V., Hansen M.J., Soumeh E.A., Adamsen A.P.S., Poulsen H.D., 2014. Effect of protein level on performance, nitrogen utilisation and carcass composition in finisher pigs. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*, 64, 123-129.
- O'Shea C.J., Lynch B., Lynch M.B., Callan J.J., O'Doherty J.V., 2009. Ammonia emissions and dry matter of separated pig manure fractions as affected by crude protein concentration and sugar beet pulp inclusion of finishing pig diets. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131, 154-160.
- Powers W., B. Zamzow S., J. Kerr B., 2007. Reduced Crude Protein Effects on Aerial Emissions from Swine. *Applied Engineering in Agriculture*, 23, 539-546.
- Oliveira V.d., Fialho E.T., Lima J.A.F., Bertechini A.G., Freitas R.T.F.d., 2005. Low crude protein diets on the nitrogen and energy metabolism of growing pig. *Teor de proteina no metabolismo do nitrogenio e da energia em suinos durante o crescimento*, 866-874.
- Otto E.R., Yokoyama M., Hengemuehle S., Trottier N.L., von Bermuth R.D., van Kempen T., 2003. Ammonia, volatile fatty acids, phenolics, and odor offensiveness in manure from growing pigs fed diets reduced in protein concentration<sup>1,2</sup>. *Journal of Animal Science*, 81, 1754-1763.
- Otto E.R., Yokoyama M., Ku P.K., Trottier N.L., Ames N.K., 2003. Nitrogen balance and ileal amino acid digestibility in growing pigs fed diets reduced in protein concentration<sup>1,2</sup>. *Journal of Animal Science*, 81, 1743-1753.
- Panetta D.M., Powers W.J., Xin H., Kerr B.J., Stalder K.J., 2006. Nitrogen Excretion and Ammonia Emissions from Pigs Fed Modified Diets Mention of a trade name, proprietary product, or specific equipment does not constitute a guarantee or warranty by the USDA and does not imply approval to the exclusion of other products that may be suitable. *Journal of Environmental Quality*, 35, 1297-1308.
- Pierce K.M., Callan J.J., McCarthy P., O'Doherty J.V., 2007. The interaction between lactose level and crude protein concentration on piglet post-weaning performance, nitrogen metabolism, selected faecal microbial populations and faecal volatile fatty acid concentrations. *Animal Feed Science and Technology*, 132, 267-282.
- Pfeiffer A., Henkel H., Verstegen M.W.A., Philipczyk I., 1998. The influence of protein intake on water balance, flow rate and apparent digestibility of nutrients at the distal ileum in growing pigs. *Livestock Production Science*, 44, 179-187.
- Quiniou N., Primot Y., Peyronnet C., Quinsac A., 2011. Des aliments porcs moins riches en protéines et formulés à base de tourteau de colza et d'acides aminés de synthèse, dont la L-Valine, permettent de réduire le recours au tourteau de soja. *Journées Rech. Porcine*, 43, 135-136.
- Rachuonyo H., Ellis M., Varela D., Curtis S., Ibarungoytia J., 2015. Nitrogen balance, ammonia and odor emissions in growing pigs fed reduced protein diets. *Rev. Mex. Cienc. Pecun.*, 6, 119-136.
- Rigolot C., Espagnol S., Pomar C., Dourmad J.-Y., 2010. Modelling of manure production by pigs and NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions. Part I: animal excretion and enteric CH<sub>4</sub>, effect of feeding and performance. *Animal*, 4, 1401-1412.
- Sajeev E.P.M., Amon B., Ammon C., Zollitsch W., Winiwarter W., 2018. Evaluating the potential of dietary crude protein manipulation in reducing ammonia emissions from cattle and pig manure: A meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110, 161-175.
- Sauvant D., Letourneau-Montminy M., Schmidely P., Boval M., Loncke C., Daniel J., 2020. Use and misuse of meta-analysis in *Animal Science*. *animal*, 14, s207-s222.
- Sauvant D., Perez J.-M., Tran G., 2004. Tables of composition and nutritional value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses and fish. Eds, Wageningen Academic Publishers
- Shriver J.A., Carter S.D., Sutton A.L., Richert B.T., Senne B.W., Pettey L.A., 2003. Effects of adding fiber sources to reduced-crude protein, amino acid-supplemented diets on nitrogen excretion, growth performance, and carcass traits of finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 81, 492-502.
- Valaja J., Alaviuhkola T., Suomi K., 1993. Reducing crude protein content with supplementation of synthetic lysine and threonine in barley-rapeseed meal-pea diets for growing pigs. *Agricultural and Food Science*, 2, 117-123.
- Valaja J., Siljander-Rasi H., 1998. Effect of dietary crude protein and energy content on nitrogen utilisation, water intake and urinary output in growing pigs. *Agricultural and Food Science in Finland*, 7, 381-390.
- Wang Y., Zhou J., Wang G., Cai S., Zeng X., Qiao S., 2018. Advances in low-protein diets for swine. *Journal of animal science and biotechnology*, 9, 60-60.
- Zhao Y., Tian G., Chen D., Zheng P., Yu J., He J., Mao X., Huang Z., Luo Y., Luo J., Yu B., 2019. Effect of different dietary protein levels and amino acids supplementation patterns on growth performance, carcass characteristics and nitrogen excretion in growing-finishing pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 10, 75.