

Revue de l'influence de la nutrition protéique sur l'impact changement climatique de la production porcine : état des lieux et perspectives

*William LAMBERT (2), Léa CAPPELAERE (1), Josselin LE COUR GRANDMAISON (2),
Aude SIMONGIOVANNI (2), Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY (1)*

(1) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, G1V 0A6, Canada

(2) METEX ANIMAL NUTRITION, 32 rue Guersant, 75017 Paris, France

Revue de l'influence de la nutrition protéique sur l'impact changement climatique de la production porcine : état des lieux et perspectives

La production porcine est à l'origine d'environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) des productions animales dans le monde. La production d'aliment et la gestion des effluents contribuent à respectivement 60 % et 30 % de l'impact total. La réduction du taux de protéines alimentaire peut agir sur ces deux sources d'émissions. Cette revue s'attache à synthétiser l'état des lieux des connaissances de l'effet de cette stratégie sur l'impact changement climatique (CC) en relation avec 1) le changement de la composition en matières premières de l'aliment et 2) la réduction de l'excrétion et des émissions azotées. Une analyse de cycle de vie (ACV) à l'échelle de l'aliment, basée sur 10 essais publiés, montre que l'impact CC est réduit de 65 kg CO₂eq/T d'aliment par point de réduction du taux protéique, grâce au remplacement graduel des matières premières les plus impactantes (tourteau et huile de soja notamment) par des céréales et des acides aminés (AA) libres, tout en maintenant les performances zootechniques. Ces bénéfices sont toutefois dépendants des matières premières disponibles et utilisées, du choix des bases de données d'évaluation environnementale, du contexte technico-économique et du niveau de départ des émissions. L'inclusion et l'origine des AA importent également puisqu'ils représentent jusqu'à 21 % de l'impact CC de l'aliment. La modélisation des émissions de composés azotés, notamment le N₂O, en fonction de l'ingéré protéique a été mise à jour par méta-analyse. En intégrant ces éléments, l'ACV en sortie de ferme indique qu'une réduction de l'impact CC par kg de porc de l'ordre de 10 % pour 1 point de baisse de protéine est atteignable. Des lacunes méthodologiques et de connaissances subsistent cependant pour correctement évaluer cette stratégie : prise en compte de l'utilisation des effluents pour la fertilisation, limites au maintien des performances, influence de la nutrition azotée sur les fermentations entériques. Des évolutions structurelles sont également nécessaires pour en faciliter la mise en pratique comme la rémunération des éleveurs pour des externalités positives.

Review of the impact of protein nutrition on the carbon footprint of pig production: current state and perspectives

Pig production is responsible for approximately 10% of the greenhouse gases (GHG) emitted by all livestock in the world. Feed production and manure management contribute 60% and 30% of these emissions, respectively. In this context, reducing dietary crude protein (CP) can influence both contributing factors. The goal of this review was to summarize current knowledge on the impact of this strategy on GHG emissions related to 1) differences in feed composition and 2) the decrease in nitrogen emissions. Life cycle assessment (LCA) of feed production, based on 10 published experiments, showed that the carbon footprint can be reduced by 65 kg CO₂ eq/T of feed for every 1-percentage-point decrease in dietary CP. This effect was obtained by gradually replacing feedstuffs with the highest impact (soya bean meal & soy oil) with cereals and feed-grade amino acids (AA), while maintaining animal performance. However, these benefits depend strongly on the available and usable feedstuffs, the choice of environmental assessment databases, the context and the potential for reduction. For example, the amount and origin of AA do matter, as they may represent up to 21% of the carbon footprint of a pig's diet. Nitrogen emission modelling has also been updated recently by meta-analytical approaches that use ingested nitrogen as the main variable. By integrating this recent knowledge, a complete LCA at the exit of the farm indicated that decreasing the impact by approximately 10% per kg of pig for a 1-percentage-point decrease in dietary CP was possible. Methodological and knowledge gaps still remain to assess this strategy well: considering the use of manure for fertilizing purposes, limits to maintaining animal performance, and the influence of nitrogen nutrition on enteric fermentation. Structural changes will also be key to facilitate adoption of this practice, such as paying pig farmers for positive externalities.

INTRODUCTION

La production porcine est à l'origine d'environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) des productions animales dans le monde, elles-mêmes représentant 14 % des émissions de GES anthropogéniques (FAO, 2018). En Europe, le secteur porcin représente 26 % des émissions des productions animales mais seulement 7 % des émissions anthropogéniques totales, la production agricole européenne ayant par ailleurs réduit ses émissions de GES de 20 % depuis 1990 (European Environment Agency, 2022). La poursuite de la réduction des émissions est un objectif majeur de l'Union Européenne et l'agriculture est un des piliers du pacte vert. La réforme de la politique agricole commune crée des politiques incitatives, avec une mise en place de stratégies locales. Un cadre législatif s'ajoutera avec la stratégie Farm to Fork. D'autres outils incitant à la baisse de l'impact changement climatique comme les crédits carbone ou les stratégies de différenciations, comme des labels bas-carbone, pourront compléter les politiques publiques pour remplir les objectifs environnementaux.

En élevage porcin, la production d'aliment et la gestion des effluents contribuent respectivement en moyenne à 60 % et 30 % de l'impact changement climatique (Andretta *et al.*, 2021). Cependant, une grande variabilité existe avec une contribution de l'aliment variant entre 30 et 90 % selon les études (Andretta *et al.*, 2021), dépendant à la fois du contexte et de la méthodologie utilisée (Figure 1). L'azote, émis dans l'atmosphère sous forme de N₂O, représente 60% de l'impact changement climatique des effluents porcins, le reste étant principalement lié aux émissions de méthane entérique ou provenant de la fermentation des déjections (FAO, 2018).

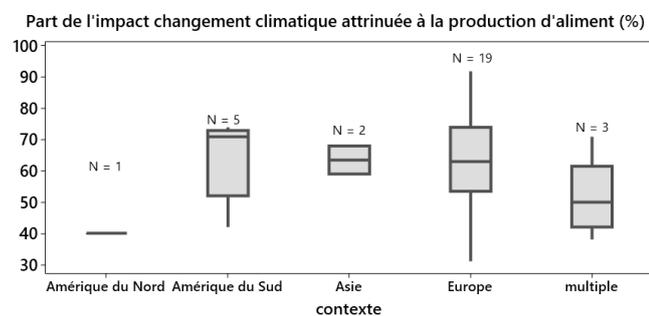


Figure 1 – Variabilité selon le contexte de la contribution de l'aliment à l'impact changement climatique dans les ACV publiées relatives à la production porcine (adapté de Andretta *et al.*, 2021)

Les stratégies nutritionnelles sont toutes indiquées pour réduire les impacts de l'élevage porcin puisqu'elles peuvent potentiellement agir sur les impacts associés à la production des aliments et ceux liés à la gestion des effluents. C'est le cas de la réduction du taux de matière azotée totale (MAT) associée à une supplémentation en acides aminés (AA) des aliments qui peut agir sur ces deux leviers. L'utilisation d'AA libres permet de couvrir les besoins des animaux tout en leur fournissant des aliments avec une teneur en protéines plus faible, limitant ainsi l'excrétion de l'azote (N) apporté en excès. Cette stratégie modifie les matières premières utilisées, en particulier une réduction de l'utilisation de matières premières riches en protéines à impact changement climatique (CC) élevé, comme le tourteau de soja. Elle permet également de réduire l'excrétion azotée et donc les émissions de N₂O, tout en maintenant les performances de croissance.

Cette revue fait un état des lieux des connaissances de l'influence de la stratégie de baisse de MAT sur les émissions de GES liées aux choix des matières premières de l'aliment et à la réduction des émissions azotées, et ses conséquences sur l'impact CC agrégé en sortie de ferme. Elle aborde ensuite les limites de connaissances actuelles et les perspectives d'application de la stratégie.

1. LA BAISSÉ DE PROTEINE POUR REDUIRE LES IMPACTS DE LA PRODUCTION D'ALIMENT

La baisse de la teneur en MAT des aliments pour porcelets et porcs charcutiers, associée à un ajustement des niveaux d'AA pour subvenir aux besoins des animaux, permet de réduire de manière importante l'inclusion de matières premières riches en protéines dans les aliments (ex. : tourteaux de soja, de colza ou de tournesol). Cette réduction est compensée par une augmentation de la part de céréales dans les régimes et donc une réduction de l'inclusion de sources de lipides (huiles et graisses). A l'échelle du territoire français, Guilbaud *et al.* (2021) ont déterminé que l'application d'une stratégie de baisse de la teneur en MAT de 2 points de % comparativement à la situation actuelle, permettrait d'économiser 450 000 T de tourteaux de soja d'import.

Les tourteaux, notamment ceux liés à un changement d'utilisation des terres (CUT), présentent en général une empreinte carbone plus élevée que les céréales (Tableau 1). Les huiles et les AA de synthèse présentent également une empreinte carbone importante mais ils sont incorporés en de plus faibles quantités dans les régimes.

Tableau 1 – Valeurs empreinte carbone d'une sélection d'ingrédients utilisés dans les aliments porc

Ingrédients	Base de données	Origine	Impact changement climatique (kg CO ₂ eq/kg)
Mais	GFLI (2019)	FR	0,47
Blé	GFLI (2019)	FR	0,42
Tourteau soja	GFLI (2019)	BR	4,29
Tourteau soja	GFLI (2019)	RER	2,68
Tourteau colza	GFLI (2019)	UA	1,29
Huile de soja	GFLI (2019)	BR	13,0
Huile de soja	GFLI (2019)	RER	8,18
L-Lys HCl	METEX NOOVISTAGO (2021)	FR	1,86
L-Lys HCl	METEX NOOVISTAGO (2021)	CN	9,15

L'effet de la baisse de la teneur en protéines sur l'impact de la production d'aliment a été un des premiers sujets des ACV en production porcine (Mosnier *et al.*, 2011 ; Meul *et al.*, 2012 ; Cherubini *et al.*, 2015). Ces ACV concernent des contextes brésiliens ou européens utilisant du soja associé au CUT. Elles rapportent toutes une réduction de l'impact de l'aliment avec la baisse de teneur en MAT quand le CUT est pris en compte mais pas toujours quand il est exclu. De plus, la réduction d'impact rapportée était faible (moins de 5 % par point de baisse de teneur en MAT). Afin de compléter ces résultats, une méta-analyse avec calcul d'empreinte carbone a été récemment réalisée (Simongiovanni *et al.*, 2022) en se basant

sur la base de données utilisée par Cappelaere *et al.* (2021). Celle-ci était constituée de 10 expériences publiées depuis les années 2000, testant au moins trois niveaux de baisse de teneur en protéines chez des porcs en croissance de 20 à 125 kg de poids vif (PV). Cette méta-analyse a permis de quantifier les variations d'inclusion des matières premières dans les aliments expérimentaux pour un point de réduction du niveau de MAT :

- Une réduction de 33 kg/T de tourteau de soja (Figure 2)
- Une augmentation de 24 kg/T des céréales totales
- Une augmentation de 2,9 kg/T des AA de synthèse

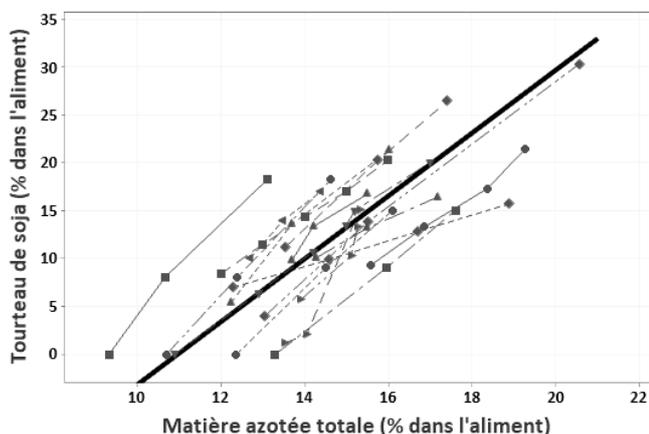


Figure 2 - Effet de la réduction du niveau de matière azotée totale de l'aliment sur l'inclusion de tourteaux de soja. Méta-analyse basée sur 10 expériences et 17 aliments porcs charcutiers (Simongiovanni *et al.*, 2022)

En utilisant la base de données de GFLI (Blonk Consultants, 2019) pour les matières premières principales, on peut calculer que l'empreinte carbone de l'aliment est réduite de 65 kg CO₂eq/T d'aliment pour un point de réduction du taux protéique en utilisant des AA produits en France (Simongiovanni *et al.*, 2022). Ces estimations concernent des aliments expérimentaux dont la composition est moins diverse que des régimes pratiques. Les bénéfices de la baisse de MAT à l'échelle de l'aliment dépendent des matières premières disponibles et utilisées, du choix des bases de données d'évaluation environnementale, du contexte et du potentiel de réduction (Cappelaere *et al.*, 2021 ; Yang *et al.*, 2022). L'intérêt de la baisse de MAT pour réduire l'impact de l'aliment est ainsi amoindri quand peu de matières premières à fort impact sont

utilisées dans le scénario de référence et/ou quand peu de matières premières à faible impact sont disponibles pour les remplacer. Dans le contexte français avec en pratique des sources de protéines diversifiées, la réduction de l'impact de l'aliment par la baisse de MAT est plus limitée et surtout dépendante de la réduction de l'utilisation de soja (Cappelaere *et al.*, 2022a).

Les valeurs proposées par les différentes bases de données pour le soja brésilien sont très variables (de 0,5 à 5,6 kg CO₂ eq/kg) et affectent fortement non seulement l'impact total de l'aliment et de la production porcine, mais aussi l'effet de la baisse de MAT pour les valeurs extrêmes (Cappelaere *et al.* 2022b, Figure 3). Ces conclusions ont été confirmées par Guilbaud *et al.* (2021).

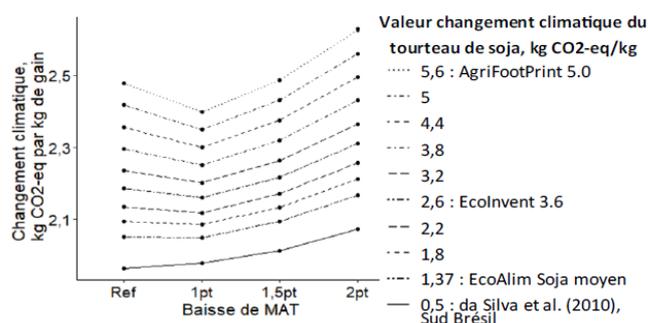


Figure 3 - Effet de la valeur de changement climatique du tourteau de soja sur le lien entre baisse de MAT et impact changement climatique par kg de gain de poids vif (Cappelaere *et al.*, 2022a)

Le niveau d'inclusion et l'origine des AA importent également puisqu'ils représentent une part importante de l'empreinte carbone des aliments pour porc à l'engrais. D'après Simongiovanni *et al.* (2022), ils représentent en moyenne 4,9 % de l'empreinte carbone d'un aliment porc s'ils sont d'origine européenne et 10,7 % s'ils sont d'origine chinoise. Cela module l'effet positif de la baisse d'un point de réduction du taux de MAT avec une réduction de l'empreinte carbone de la production de porc de 148 kg CO₂-eq par T de PV contre seulement 76 kg CO₂-eq en utilisant des AA d'origine chinoise (Simongiovanni *et al.*, 2022 ; Figure 4). Les bénéfices marginaux de la baisse de la teneur en MAT sur l'impact CC de l'aliment

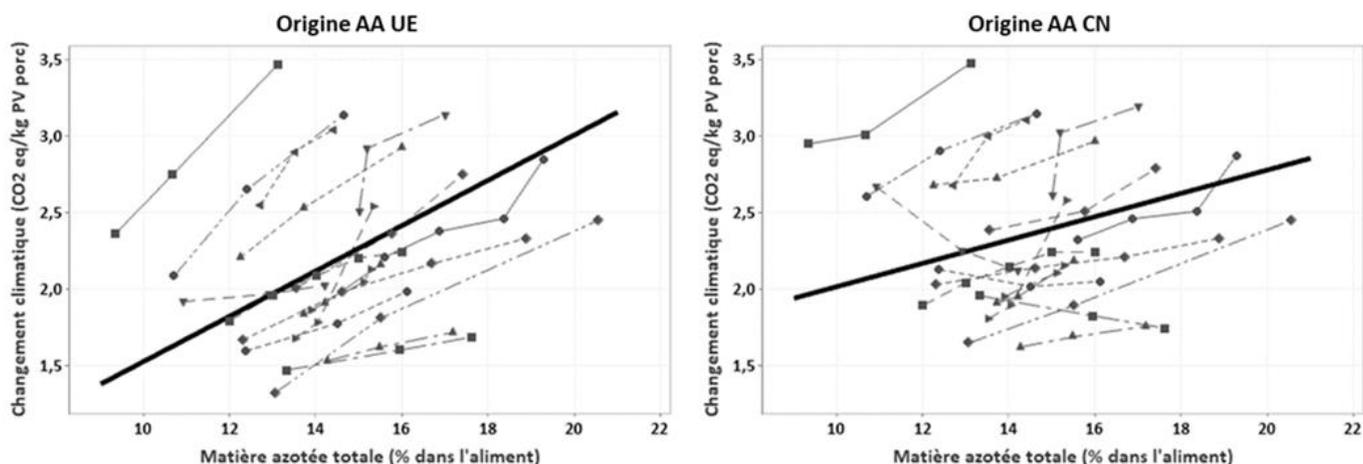


Figure 4 - Effet de la réduction de la teneur en matière azotée totale de l'aliment sur l'impact changement climatique par kg de PV de porc produit en fonction de deux scénarios d'origine des acides aminés (AA) : Europe (UE) et Chine (CN). Méta-analyse basée sur 10 expériences et 17 aliments porc charcutiers (Simongiovanni *et al.*, 2022)

sont réduits pour des baisses très importantes de MAT ; les contraintes nutritionnelles deviennent alors de plus en plus importantes et la baisse de l'utilisation de soja atteint un palier, ce qui s'accompagne de l'incorporation accrue de nouveaux AA à fort impact (Garcia-Launay *et al.*, 2014 ; Cappelaere *et al.*, 2022a ; Cappelaere *et al.*, 2022b).

2. LA BAISSÉ DE L'APPORT EN PROTEINES POUR REDUIRE LES IMPACTS DE LA GESTION DES EFFLUENTS

En plus de l'impact sur la composition de l'aliment, la réduction du taux de MAT dans les aliments permet une meilleure efficacité azotée et donc une moindre excrétion d'azote à l'échelle de l'élevage. Cette réduction passe principalement par la réduction de l'excrétion urinaire, fraction de l'azote des effluents qui réagit et se volatilise rapidement, permettant de réduire efficacement les émissions. Ces bénéfices ont été quantifiés par une approche méta-analytique combinant 43 expériences et 126 traitements alimentaires pour l'excrétion azotée et les émissions d'ammoniac. Les résultats montrent une baisse de respectivement 8 % et 10% de l'excrétion N totale et urinaire et de 10 % de des émissions d'ammoniac par point de baisse de MAT (Cappelaere *et al.*, 2021 ; Figure 5). L'évaluation précise des émissions d'ammoniac jusqu'au stockage des effluents est facilitée par la mise à disposition d'outils de prédiction basés sur des mesures expérimentales en élevage, incluant les facteurs d'émission publiés. On peut ainsi calculer qu'à l'échelle de la France, une réduction du taux de MAT de 2 points de % permettrait de réduire les émissions d'ammoniac de 5 400 T (Guilbaud *et al.*, 2021). En revanche, les émissions de protoxyde d'azote (N₂O), qui possède un pouvoir de

réchauffement climatique 300 fois plus élevé que celui du CO₂, sont difficilement mesurables et les facteurs d'émission dans les bâtiments et lors du stockage des effluents sont très variables dans la bibliographie. Par ailleurs, la majeure partie des émissions a lieu au champ, où les émissions sont très variables et particulièrement difficiles à mesurer (effet de la nature du sol et des cultures, de la météo, des pratiques culturales, des pratiques d'épandage). Aussi, les facteurs d'émissions fixes proposés par le GIEC et l'EMEP (IPCC, 2019 ; EMEP/EEA, 2016, 2019) sont généralement utilisés pour estimer ces émissions. En utilisant cette méthodologie, on peut calculer qu'une réduction du taux de MAT de 1 point de % chez le porc charcutier permettrait de réduire les émissions de N₂O de 10,1 % (Millet *et al.*, 2022). Des travaux sont en cours pour confirmer ou invalider les facteurs d'émissions de composés azotés disponible et préciser l'influence de la baisse de la teneur en MAT sur ces facteurs fixes. L'amélioration de la prédiction de l'impact de la baisse du taux de MAT sur les émissions de N₂O est cruciale car le N₂O contribue à hauteur de 8,2 % aux émissions de GES du porc (FAO, 2013). Les émissions de méthane (CH₄) ne sont pas non plus à négliger du fait de la contribution importante du CH₄ aux émissions de GES du porc : 3 % liée à la fermentation entérique et 19 % liée à la gestion des effluents (FAO, 2013). L'effet des stratégies de baisse de teneur en MAT dépend des matières premières utilisées et de la variation de la teneur en fibres fermentescibles. La baisse de MAT réduit la production de CH₄ entérique (Atakora *et al.*, 2011) sauf quand des matières premières alternatives riches en fibres sont utilisées (Seradj *et al.*, 2028). Concernant les émissions du lisier, il n'y a pas d'effet de la baisse de la teneur en MAT sur les émissions de CH₄ au bâtiment sauf quand le contenu en fibres de l'aliment est augmenté (Jarret *et al.*, 2011, Hansen *et al.*, 2014).

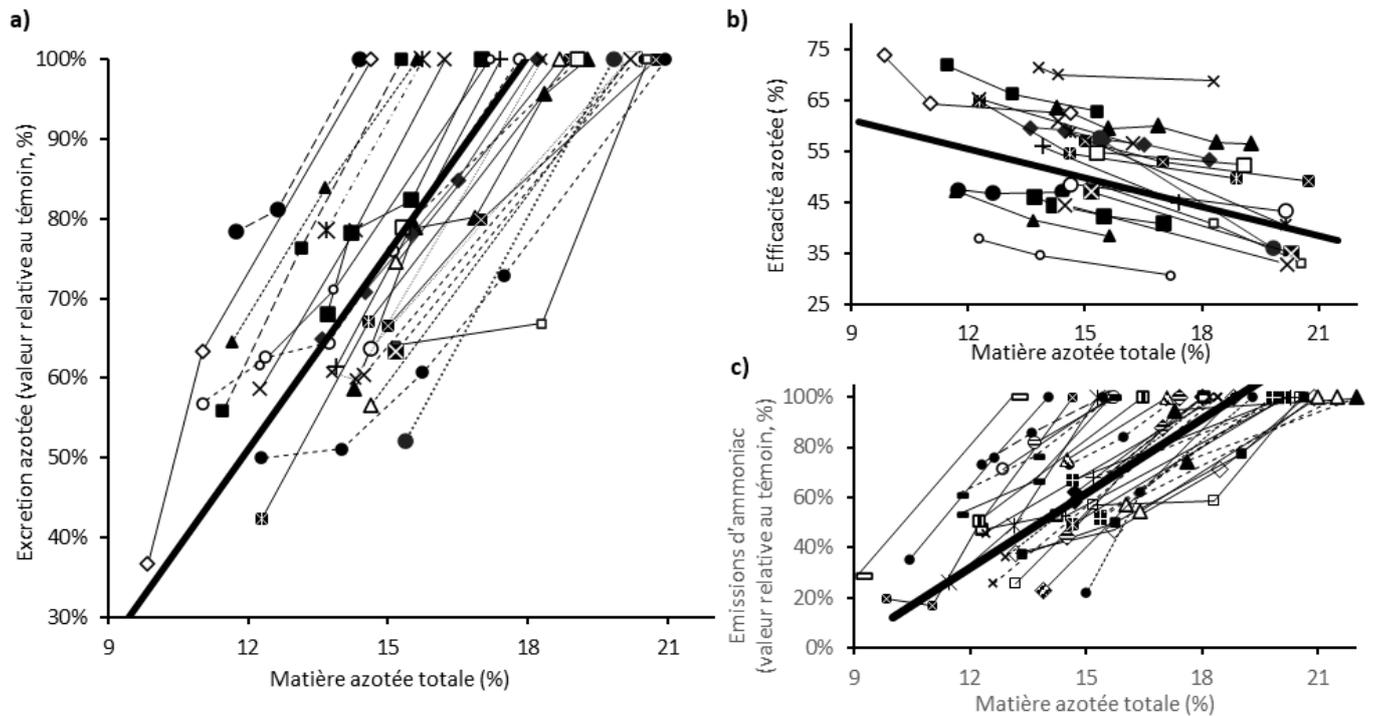


Figure 5 – Effet de la baisse de la teneur en matière azotée totale de l'aliment chez le porc charcutier sur : a) l'excrétion totale d'azote, b) l'efficacité azotée, c) les émissions d'ammoniac (adapté de Cappelaere *et al.*, 2021)

3. EVALUATION GLOBALE DE L'EFFET DE LA BAISSSE DE PROTEINES PAR ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'ACV en sortie de ferme est l'outil approprié pour évaluer une stratégie multifactorielle comme la baisse de la teneur en MAT des aliments. Six études relatives à ce sujet ont été publiées en production porcine avant 2018 (Cherubini *et al.*, 2015 ; Garcia-Launay *et al.*, 2014 ; Kebreab *et al.*, 2016 ; Monteiro *et al.*, 2016, 2017 ; Ogino *et al.*, 2013). Leurs résultats concernant la réduction de l'impact changement climatique par kg de porc produits sont rapportés à la figure 6 relativement au témoin. Toutes les études rapportent un impact positif de la stratégie, avec parfois un plafonnement ou une dégradation pour des baisses importantes de MAT. Deux publications mettent en évidence l'importance du contexte de l'étude sur les bénéfices de la stratégie (Kebreab *et al.*, 2016 ; Monteiro *et al.*, 2016), notamment avec des bénéfices plus limités pour le contexte nord-américain ou sud-américain dans le cas de l'utilisation de tourteau de soja non associé à la déforestation. Une limite majeure à ces études est le choix du témoin, souvent haut en protéines par rapport aux pratiques actuelles, surestimant les bénéfices possibles de la stratégie de réduction de la teneur en MAT. Les ACV publiées utilisent soit une hypothèse performances constantes, soit une approche par modélisation, qui prend en compte l'effet éventuel de la réduction de teneur en MAT sur les performances, avec toutefois dans ces études des performances également très stables selon le niveau de MAT. Or, le succès de la réduction du taux de MAT est dépendant du maintien des performances de croissance. Des baisses de teneur en MAT modérées par rapport à la situation actuelle (2 à 3 points de %) n'affectent pas les performances (Cappelaere *et al.*, 2021). Cependant, des réductions beaucoup plus importantes de teneur en MAT peuvent entraîner une baisse du dépôt protéique (Gonzalo *et al.*, 2022a) en particulier lorsque les apports en acides aminés essentiels ne sont pas correctement assurés. La méta-analyse conduite par Simongiovanni *et al.* (2022) a permis de prendre en compte pour le calcul de l'impact changement climatique par kg de porc vif les résultats d'essais récents conduits chez le porc charcutier afin de déterminer si de fortes baisses de la teneur en MAT permettaient de maintenir les niveaux de performance. Cette méta-analyse a mis en évidence de faibles variations de performances qui n'ont pas affecté l'impact positif de la stratégie sur le changement climatique (Figure 4).

Les résultats des ACV en sortie de ferme pour le changement climatique sont principalement affectés par l'effet sur

l'impact de l'aliment, ce qui est logique étant donné sa contribution. Ainsi, les mêmes observations que celles rapportées ci-dessus pour l'aliment, sur l'importance de l'origine des matières premières utilisées, notamment le soja lié ou non à de la déforestation, les références utilisées pour les leurs impacts, et l'origine des AA, peuvent être faites pour l'ACV globale en sortie de ferme. Une augmentation de l'impact changement climatique de l'aliment est en effet difficilement compensée par une réduction de l'impact de la gestion des effluents (Cappelaere *et al.*, 2022b ; Cappelaere *et al.*, 2022a ; Garcia-Launay *et al.*, 2014).

Une ACV complète prenant en compte l'impact de l'origine des AA (Europe vs Chine) a été effectuée dans un contexte allemand chez le porc à l'engrais en utilisant les équations de prédiction des émissions azotées comme proposées par Cappelaere *et al.* (2021). Les résultats (Braconi *et al.*, 2023) sont présentés dans le tableau 2. Avec une origine européenne des AA, l'impact changement climatique du porc à l'engrais est évaluée à 3,71 kg CO₂eq/kg PV contre à 3,85 kg CO₂eq/kg PV avec une origine chinoise des AA. La diminution de la teneur en MAT des aliments réduit l'impact changement climatique de 8,1 ± 1,7 % avec des AA européens et 5,7% avec des AA chinois. L'acidification et l'eutrophisation ont aussi été calculées et sont réduits de respectivement 9 et 8% avec des AA européens et chinois.

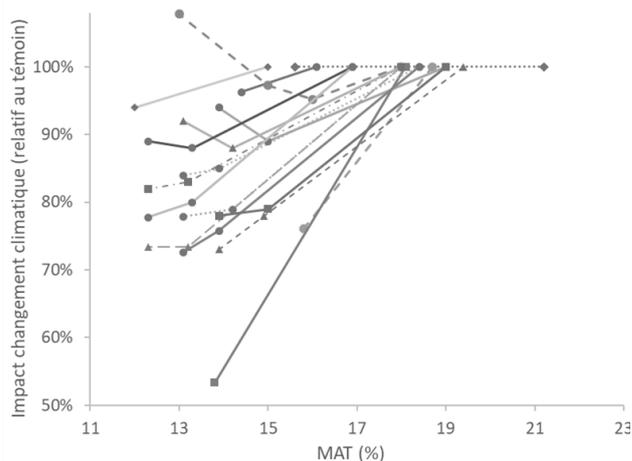


Figure 6 – Réduction de l'impact changement climatique chez le porc charcutiers en fonction de la teneur en matière azotée totale (MAT) de l'aliment dans les ACV sortie de ferme publiées (adapté de Cappelaere *et al.*, 2021)

Tableau 2 – Effet d'une réduction d'un point de % de MAT des aliments et de l'origine¹ des acides aminés (AA) sur les résultats de l'analyse de cycle de vie de la production porcine pour les impacts changement climatique (CC, kg CO₂ eq ; incluant ou non le changement d'utilisation des terres (CUT)), acidification terrestre et d'eau douce (AC, mol H⁺ eq) et eutrophisation terrestre (EU, mol N eq) (Braconi *et al.*, 2023)

Impact	AA d'origine UE (scénario de base)			AA d'origine CN			Δ AA d'origine CN vs AA d'origine UE	
	Aliments standards	Aliments basse MAT	Δ basse MAT vs standard	Aliments standards	Aliments basse MAT	Δ basse MAT vs standard	Aliments standards	Aliments basse MAT
CC, kg CO ₂ eq	3,71	3,41	-8,1%	3,85	3,63	-5,7%	3,8%	6,5%
CC hors CUT, kg CO ₂ eq	2,64	2,63	-0,4%	2,78	2,85	2,5%	5,3%	8,4%
AC, mol H ⁺ eq	0,068	0,062	-9,0%	0,069	0,064	-7,6%	1,9%	3,4%
EU, mol N eq	0,300	0,273	-9,0%	0,303	0,278	-8,3%	1,0%	1,8%

¹l'origine des AA est comparée entre l'Europe (UE – scénario de base) et la Chine (CN)

4. LACUNES METHODOLOGIQUES ET MANQUE DE CONNAISSANCES POUR EVALUER LES STRATEGIES DE BAISSSE DE TENEUR EN PROTEINES

Des lacunes subsistent pour pleinement évaluer les impacts de la baisse de teneur en protéines des aliments, notamment en termes de cadre méthodologique, modèles disponibles et connaissances des effets de la stratégie sur les performances des animaux et sur les processus biochimiques menant aux émissions de GES des lisiers. Certains travaux récents (Garcia-Launay *et al.*, 2018), vont dans ce sens sur la base de modèles individus-centrés représentant les effets de l'alimentation sur les performances, la production entérique de méthane et les émissions des effluents.

La prise en compte de l'effet de la stratégie d'alimentation sur les émissions après épandage des effluents, en particulier celles de N₂O, est aussi un point clé, étant donné que 25 % de l'impact changement climatique de la production porcine est lié aux émissions au champ (FAO, 2018). Dans une ACV, cette prise en compte signifie que la multifonctionnalité des effluents ne peut pas être gérée par une séparation des processus mais nécessite une extension de système permettant d'inclure leur valorisation dans le système étudié. Le défi est alors de correctement représenter l'utilisation des effluents et d'éviter le double comptage avec les émissions liées à la fertilisation des cultures (Rigolot *et al.*, 2009). La méthode la plus répandue considère que tout le lisier est épandu sur les cultures destinées à l'alimentation des porcs. L'inventaire utilisé pour l'impact des cultures n'est généralement pas modifié mais un correctif est appliqué pour prendre en compte la différence d'émissions entre une fertilisation organique et minérale. De plus, une économie de fertilisant minéral est généralement incluse, considérant que les fertilisants organiques remplacent une production de fertilisant minéral. L'azote ammoniacal est alors considéré comme aussi bien valorisé que l'azote des fertilisants minéraux, alors que la valeur fertilisante des formes stables d'azote n'est pas prise en compte car elles ne sont pas disponibles à court terme pour les cultures. Ces hypothèses permettent d'utiliser un facteur fixe d'économie de fertilisant minéral. Si la composition du lisier est bien connue, il s'agit d'une bonne approximation. Cependant, elle ne prend pas en compte les pratiques de fertilisation dans le contexte d'étude et plus précisément les limites à la valorisation possible des fertilisants organiques, compte tenu de la densité d'élevages sur le territoire. Un autre défi est donc d'estimer l'effet de la modification du volume et de la composition du lisier sur les pratiques de fertilisation sur le territoire étudié, i.e. augmentation de l'utilisation de fertilisant minéral ou réduction des excédents. Leip *et al.* (2019) suggèrent une méthode permettant une estimation de la valeur à donner aux effluents d'élevage, en prenant en compte sa valorisation réelle dans le système. Cette meilleure représentation de l'effluent comme co-produit permet de mieux évaluer les stratégies permettant une utilisation plus durable des fertilisants organiques. En revanche, elle nécessite une connaissance profonde du système de production et une lourde collecte de données. Cappelaere *et al.*, (2022a) ont comparé les ACV calculées avec les deux méthodes principalement utilisées : (i) séparation des processus et (ii) extension de système associé à une économie de fertilisant minéral. Les valeurs des impacts changent de façon importante ; les impacts changement climatique et demande en énergie diminuent avec les crédits de fertilisant minéral, et au contraire les impacts acidification et

eutrophisation sont plus élevés à cause d'émissions au champ plus importantes. Néanmoins, le choix méthodologique n'affecte pas l'évaluation de l'intérêt de la stratégie d'alimentation. Le passage à une ACV territoriale est une bonne solution pour pouvoir correctement représenter les effets de la stratégie sur l'utilisation des sols et la valorisation des effluents mais le cadre méthodologique est en construction (Espagnol *et al.*, 2018 ; Ahmed *et al.*, 2020).

La prise en compte de l'effet de la modification de la composition des effluents sur les émissions est limitée par le manque de modèles précis d'émissions (Cederberg *et al.*, 2013). Plus largement, les facteurs d'émission pour le N₂O sont très incertains car très variables et difficiles à mesurer. De plus, l'évaluation des émissions au champ est complexe, dû à l'interaction entre pratiques de fertilisation, sol, cultures, climat et météo (Wang *et al.*, 2021). Les modèles proposés tentent de capter cette complexité mais sont lourds à mettre en œuvre pour l'évaluation des systèmes de productions animales (Nemecek *et al.*, 2016 ; Notarnicola *et al.*, 2017). Les modèles de prédiction des émissions de CH₄ disponibles sont plus précis que ceux concernant le N₂O et l'azote plus généralement (Cederberg *et al.*, 2013).

La limite au maintien des performances de croissance des animaux avec une baisse importante de la teneur en MAT reste aussi à confirmer expérimentalement (Cappelaere *et al.*, 2022c). Différents essais explorant les points éventuels de rupture sont en cours. Dans le futur, un compromis sera à trouver entre baisse de performance et réduction des impacts environnementaux. Dans ce cadre, le développement de modèles d'optimisation à l'échelle de l'atelier ou de la ferme sera nécessaire (Davoudkhani *et al.*, 2020). Les performances animales mais aussi les facteurs d'émission ou les inventaires des cultures pour l'alimentation animale comportent beaucoup de variabilité et d'incertitude dues à la nature du vivant, mais celle-ci est rarement prise en compte dans les ACV réalisées qui manquent trop souvent d'analyses de sensibilité et d'incertitude.

Cependant, beaucoup de ces défis méthodologiques (prise en compte des effluents dans la stratégie de fertilisation, influence des stratégies sur le niveau de performance de l'élevage, précision des facteurs d'émission) sont des limites partagées par l'ensemble des ACV en production animale (Notarnicola *et al.*, 2017). Il est donc important de relativiser ces lacunes qui ne sont pas propres aux ACV visant à évaluer les impacts environnementaux des stratégies de baisse de MAT.

5. MISE EN PLACE PRATIQUE DE LA STRATEGIE ET PERSPECTIVES

Les stratégies de baisse de MAT présentent un intérêt pour réduire les impacts au niveau de la production des aliments et des émissions liées aux effluents. Le focus est souvent mis sur le changement climatique mais la réduction des impacts environnementaux devrait être réfléchie de manière holistique et inclure des impacts comme l'acidification ou l'eutrophisation mais aussi l'utilisation de sols ou la production à destination de l'alimentation humaine dont les méthodologies de calculs restent à élaborer et harmoniser (de Boer *et al.*, 2011). La baisse de teneur en MAT a l'avantage de réduire très significativement les impacts eutrophisation, acidification et émissions de particules fines en plus de diminuer l'impact changement climatique. En pratique, il est possible de réduire les niveaux de MAT de 1, 2 voire 3 points de pourcentage par rapport à la

situation actuelle sans affecter les performances (Gonzalo *et al.*, 2022b ; Millet *et al.*, 2022). Toutefois, en fonction des contextes, appliquer une réduction de MAT peut engendrer des surcoûts liés à l'aliment (Guilbaud *et al.*, 2021). Afin de faciliter l'adoption de telles pratiques, il est donc nécessaire de trouver des solutions pour compenser financièrement les efforts consentis par la filière porcine. Dans le cadre du Label Bas Carbone, la baisse de teneur en MAT est identifiée comme une des stratégies disponibles pour activer des « crédits carbone » par les éleveurs car elle répond à quatre des six piliers rétributeurs (Espagnol, 2021). Les stratégies de différenciation basées sur la réduction des impacts environnementaux initiées par la filière porcine et associées aux politiques publiques d'incitation, devront financer les stratégies de réduction des impacts comme la baisse de teneur en protéines, pour conserver une production rentable.

La limite des bénéfices associés à la baisse de MAT sera atteinte plus ou moins vite selon les contextes. La réduction des impacts liés à l'excrétion azotée dépend du maintien ou non des performances des animaux. La réduction des impacts de l'aliment dépend fortement du potentiel de réduction de l'incorporation du tourteau de soja. Il est alors intéressant de combiner la baisse de teneurs en protéines à une autre stratégie plus globale, la formulation multi-objectif, afin de continuer à réduire l'impact changement climatique de l'aliment quand le soja a été retiré de la formule (Garcia-Launay *et al.*, 2018 ; Méda *et al.*, 2021). D'autre part, l'alimentation multi-phase et la nutrition de précision à l'échelle de l'individu sont de bons compléments à la baisse de MAT afin de maximiser les bénéfices environnementaux (Andretta *et al.*, 2018 ; Pomar *et al.*, 2014). La mise en application de ces pratiques nécessitera

également un soutien financier et une rétribution pour accompagner l'investissement et le surcoût éventuel.

CONCLUSION

La baisse de la teneur en MAT des aliments est une stratégie actuellement efficace pour réduire l'impact changement climatique de la production porcine. Cela passe par la réduction de l'impact de la production de l'aliment, principalement via la réduction de l'utilisation de soja associé à la déforestation. La baisse de MAT réduit également de façon efficace l'excrétion azotée et les émissions de GES qui en découlent, comme celles de N₂O. Toutefois, les matières premières utilisées et l'origine des AA ont un impact important sur la magnitude possible de la réduction des émissions de GES. La recherche doit aujourd'hui se concentrer sur l'étude de stratégies de baisses importantes des teneurs en MAT afin d'identifier les critères de succès et les points limites dans des contextes variés en termes de disponibilité et de prix des matières premières.

Par ailleurs, de nombreux points méthodologiques doivent être affinés pour des ACV réalisées en sortie de ferme afin de les rendre plus représentatives de l'ensemble du système de production. Cela concerne notamment la modélisation des émissions des effluents et l'évaluation des effets sur la disponibilité en fertilisant. Une faible baisse de teneur en MAT est possible à moindre coût dans le contexte européen pour une mise en place à court terme de la stratégie, mais des baisses plus importantes devront s'accompagner de soutiens financiers ou de moyens de rémunération alternatifs pour financer le surcoût.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmed M., Ahmad S., Waldrip H.M., Ramin M., Ali Raza M., 2020. Whole Farm Modeling: A Systems Approach to Understanding and Managing Livestock for Greenhouse Gas Mitigation, Economic Viability and Environmental Quality. In: *Animal Manure: Production, Characteristics, Environmental Concerns, and Management*, H.M. Waldrip, P.P. Pagliari, Z. He (Eds), ASA Special Publication 67; ASA and SSSA, Madison, WI, USA, 345-371.
- Andretta I., Hauschild L., Kipper M., Pires P.G.S., Pomar C., 2018. Environmental impacts of precision feeding programs applied in pig production. *Animal*, 12, 1990-1998.
- Andretta I., Hickmann F. M. W., Remus A., Franceschi C. H., Marian, A. B., Orso C., Kipper M., Létourneau-Montminy M.-P., Pomar, C., 2021. Environmental Impacts of Pig and Poultry Production: Insights From a Systematic Review. *Front. Vet. Sci.*, 8, 750733.
- Atakora J.K.A., Moehn S., Ball R.O., 2011. Enteric methane produced by finisher pigs is affected by dietary crude protein content of barley grain based, but not by corn based, diets. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 166-167, 412-421.
- Blonk Consultants, 2019. GFLI Database of Animal Feed Production. LCA Feed database. <https://globalfeedlca.org/gfli-database/lcia-download/>
- Braconi N., Castellana D., Blonk H., Martin N., Lambert W., Simongiovanni A., Le Cour Grandmaison J., 2023. Analyse de cycle de vie de la production porcine – Effet d'une réduction de la teneur en protéines des aliments et de l'origine des acides aminés – Cas pratique en Allemagne du Nord. *Journées Rech. Porcine*, 55, 255-260.
- Cappelaere L., van Milgen J., Syriopoulos K., Simongiovanni A., Lambert W., 2021. Quantifying benefits of reducing dietary crude protein on nitrogen emissions of fattening pigs: a meta-analysis. *Journées Rech. Porcine*, 53, 273-278.
- Cappelaere L., Létourneau-Montminy M.-P., Lambert W., Martin N., Garcia-Launay F., 2022a. Life cycle assessment (LCA) of low-crude protein strategies for fattening pigs. *Journées Rech. Porcine*, 54, 215-220.
- Cappelaere L., Létourneau-Montminy M.-P., Garcia-Launay F., 2022b. 32. Evaluation of low crude protein diets for fattening pigs using two life cycle assessment modelling approaches. *Anim. Sci. Proc.*, 13, 547-548.
- Cappelaere L., van Milgen J., Syriopoulos K., Simongiovanni A., Lambert W., Létourneau-Montminy M.-P., 2022c. 167 Effect of Reducing Dietary Crude Protein on Growth Performance of Fattening Pigs: A Meta-Analysis. *J. Anim. Sci.*, 100, 81-81.
- Cederberg, C., Henriksson, M., Berglund, M., 2013. An LCA researcher's wish list – data and emission models needed to improve LCA studies of animal production. *Animal*, 7, 212-219.
- Cherubini E., Zanghelini G.M., Tavares J.M.R., Beletini F., Soares S.R., 2015. The finishing stage in swine production: influences of feed composition on carbon footprint. *Environ. Dev. Sustain.*, 17, 1313-1328.
- De Boer I. J. M., Cederberg C., Eady S., Gollnow S., Kristensen T., Macleod M., Meul M., Nemecek T., Phong L. T., Thoma G., 2011. Greenhouse gas mitigation in animal production: towards an integrated life cycle sustainability assessment. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 3, 423-431.
- Davoudkhani M., Mahé F., Dourmad J. Y., Gohin A., Darrigrand E., Garcia-Launay F., 2020. Economic optimization of feeding and shipping strategies in pig-fattening using an individual-based model. *Agric. Syst.*, 184, 102899.
- EMEP/EEA, 2016. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (3. B Manure Management). EEA Report No 21/2016.
- EMEP/EEA, 2019. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (3. B Manure Management). EEA Report No 13/2019.

- Espagnol S., Lauer M., Aissani L., Wilfart A., 2018. Feed eco-design: how to make a good decision? Part 2-rebound effects of eco-feed production. In The 11th International Conference on Life Cycle Assessment of Food (LCA Food 2018) in conjunction with the 6th LCA AgriFood Asia and the 7th International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI), 16-20.
- Espagnol S., 2021. 3. Implementation of mitigation strategies in livestock chain: the case of "Label bas carbone" for pig production in France. *Animal - science proceedings*, 12, 250-252.
- European Environment Agency, 2022. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2020 and inventory report 2022 — European Environment Agency. Brussels, <https://www.eea.europa.eu/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-1>.
- FAO, 2018. Environmental performance of pig supply chains: Guidelines for assessment (Version 1). FAO, Rome, 176p.
- Garcia-Launay F., Dusart L., Espagnol S., Laisse-Redoux S., Gaudré D., Méda B., Wilfart A., 2018. Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *British Journal of Nutrition*, 120, 1298-1309.
- Garcia-Launay F., van der Werf H.M.G., Nguyen T.T.H., le Tutour L., Dourmad J.Y., 2014. Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in pig production using Life Cycle Assessment. *Livest. Sci.*, 161, 158-175.
- Gonzalo E., Labussière E., Simongiovanni A., Lambert W., van Milgen J., 2022a. Effect of dietary protein level on energy utilization in growing pigs. 7th EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition (ISEP), Grenade, Spain, 12-15 September 2022.
- Gonzalo E., Lambert W., Alleno C., Simongiovanni A., 2022b. Quantification of the reduction of dietary protein on growth performance and environmental impact in growing pigs. 7th EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition (ISEP), Grenade, Spain, 12-15 September 2022.
- Guilbaud T., Martin N., Lambert W., Le Cour Grandmaison J., Bourgeat E., 2021. Effets de l'évolution de la nutrition azotée chez les monogastriques : modélisation à l'échelle de la France. Approche historique et prospective, focus sur l'espèce porcine. *Journées Rech. Porcine*, 53, 279-284.
- 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. *Livest. Sci.*, 169, 118-124.
- IPCC, 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Jarret G., Martinez J., Dourmad J. Y., 2011. Effect of biofuel co-products in pig diets on the excretory patterns of N and C and on the subsequent ammonia and methane emissions from pig effluent. *Animal*, 5(4), 622-631.
- Kebreab E., Liedke A., Caro D., Deimling S., Binder M., Finkbeiner M., 2016. Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. *J. Anim. Sci.*, 94, 2664-2681.
- Leip A., Ledgard S., Uwizeye A., Palhares J.C.P., Aller M.F., Amon B., Binder M., M.d.S. Cordovil C., De Camillis C., Dong H., Fusim A., Helinn J., Hörtenhuber S., Hristov A.N., Koelsch R., Liu C., Masso C., Nkongolo N.V., Patraw A.K., Redding M.R., Rufino M.C., Sakrabani R., Thoma G., Vertès F., Wang Y., 2019. The value of manure - Manure as co-product in life cycle assessment. *J Environ Manage*, 241, 293-304.
- Méda B., Garcia-Launay F., Dusart L., Ponchant P., Espagnol S., Wilfart A., 2021. Reducing environmental impacts of feed using multiobjective formulation: What benefits at the farm gate for pig and broiler production? *Animal*, 15, 100024.
- Millet S., Lambert W., Le Cour Grandmaison J., Simongiovanni A., Zhuang S., de Cuyper C., Doudah L., Aluwe M., Brusselman E., 2022. Effet d'une baisse des taux protéiques dans les aliments des porcs sur les performances, la qualité de carcasse et les émissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre durant la période de finition. *Journées Rech. Porcine*, 54, 249-250.
- Meul M., Ginneberge C., van Middelaar C. E., de Boer I. J. M., Fremaut D., Haesaert G., 2012. Carbon footprint of five pig diets using three land use change accounting methods. *Livest Sci*, 149, 215-223.
- Monteiro A.N.T.R., Garcia-Launay F., Brossard L., Wilfart A., Dourmad J.Y., 2016. Effect of feeding strategy on environmental impacts of pig fattening in different contexts of production: evaluation through life cycle assessment. *J. Anim. Sci.*, 94, 4832-4847.
- Monteiro A.N.T.R., Dourmad J.-Y., Pozza P.C., 2017. Life cycle assessment as a tool to evaluate the impact of reducing crude protein in pig diets. *Ciência Rural*, 47, np.
- Mosnier E., van der Werf H.M.G., Boissy J., Dourmad J.-Y., 2011. Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in the manufacturing of pig and broiler feeds using Life Cycle Assessment. *Animal*, 5, 1972-1983.
- Nemecek T., Schnetzer J., Reinhard J., 2016. Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crop inventories. *Int. J. Life Cycle Ass.*, 21, 1361-1378.
- Notarnicola B., Sala S., Anton A., McLaren S. J., Saouter E., Sonesson U., 2017. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *J. Clean Prod.*, 140, 399-409.
- Ogino A., Osada T., Takada R., Takagi T., Tsujimoto S., Tonoue T., Matsui D., Katsumata M., Yamashita T., Tanaka Y., 2013. Life cycle assessment of Japanese pig farming using low-protein diet supplemented with amino acids. *Soil. Sci. Plant Nutr.*, 59, 107-118.
- Pomar C., Pomar J., Dubeau F., Joannopoulos E., Dussault J.P., 2014. The impact of daily multiphase feeding on animal performance, body composition, nitrogen and phosphorus excretions, and feed costs in growing-finishing pigs. *Animal*, 8, 704-713.
- Rigolot, C., Méda, B., Espagnol, S., Trochet, T., & Dourmad, J.-Y., 2009. Analyse de cycle de vie (ACV) de 5 systèmes porcins avec différentes hypothèses de comptabilisation des impacts. *Journées Rech. Porcine*, 41, 281-282.
- Seradj A.R., Balcels J., Morazan H., Alvarez-Rodriguez J., Babot D., de la Fuente G., 2018. The impact of reducing dietary crude protein and increasing total dietary fiber on hindgut fermentation, the methanogen community and gas emission in growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 245, 54-66.
- Simongiovanni A., Le Cour Grandmaison J., Lambert W., 2022. Quantification of the benefits of reducing dietary crude protein level for fattening pigs in terms of global warming potential depending on the origin of amino acids: a meta-analysis. 7th EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition (ISEP), Grenade, Spain, 12-15 September 2022.
- Wang C., Amon B., Schulz K., Mehdi B., 2021. Factors that influence nitrous oxide emissions from agricultural soils as well as their representation in simulation models: A review. *Agronomy*, 11, 770.
- Yang Z., Hung Y., Jang J.C., Urriola P.E., Johnston L.J., Hurson G.C., 2022. 72 Life Cycle Assessment of Environmental Impacts of Swine Growing-Finishing Feeding Programs Using Different Amounts of Soybean Meal, Distillers Dried Grains with Solubles, and Crystalline Amino Acids. *Anim. Sci. Proc.*, 100, 27-28.