

# Nutrition protéique du porc et changement climatique : état des lieux et perspectives

Léa CAPPELAERE<sup>1</sup>, William LAMBERT<sup>2</sup>, Josselin LECOUR GRANDMAISON<sup>2</sup>, Aude SIMONGIOVANNI<sup>2</sup>,  
Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département des sciences animales, Université Laval, G1V 0A6, Québec, Canada

<sup>2</sup>METEX ANIMAL NUTRITION, 32 rue Guersant, 75017, Paris, France

Courriel : marie-pierre.letourneau-montminy.1@ulaval.ca

Aude.Simongiovanni@metex-noovistago.com

■ Réduire l'impact des filières d'élevage sur le changement climatique est un enjeu majeur. Les stratégies alimentaires permettant d'améliorer l'efficacité des animaux et de réduire les émissions de gaz à effet de serre sont des leviers majeurs. La baisse du taux de protéines des aliments pour porcs est une stratégie reconnue en Europe pour réduire l'utilisation de soja issu de la déforestation et les excédents territoriaux d'azote. Quels sont ses bénéfices et ses limites ?<sup>1</sup>

## Introduction

Dans le monde, la production porcine est à l'origine d'environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre (GES, encadré 1) des productions animales, elles-mêmes représentant 14 % des émissions de GES anthropogéniques (FAO, 2018), soit 1,4 % des émissions anthropogéniques totales. En Europe, le secteur porcin représente 26 % des émissions de GES des productions animales mais seulement 1,7 % des émissions anthropogéniques totales. Par ailleurs, la production agricole européenne a réduit ses émissions de GES de 20 % depuis 1990, baisse surtout associée à la réduction des émissions de N<sub>2</sub>O des sols agricoles et de méthane entérique des ruminants (European Environment Agency, 2022). La poursuite de la réduction des émissions est un objectif majeur de l'Union européenne (UE) 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 (CC, encadré 1) comme les crédits carbone ou les stratégies de différenciations, comme des labels bas-carbone, issus d'initiatives privées ou publiques, à différentes échelles (sectorielle, nationale, européenne...) pourront compléter les politiques publiques de l'UE pour remplir les objectifs environnementaux du secteur agricole.

En élevage porcin, la production d'aliment et la gestion des effluents contribuent respectivement en moyenne à 60 % et 30 % de l'impact CC (Andretta *et al.*, 2021). Cependant, une grande variabilité de cette répartition existe avec une contribution de l'aliment

allant de 30 à 90 % selon les études (Andretta *et al.*, 2021), dépendant du contexte géographique, mais aussi de la méthodologie utilisée (figure 1). L'impact CC des effluents porcins est causé à 60 % par l'azote émis dans l'atmosphère sous forme de N<sub>2</sub>O, au pouvoir réchauffant 200 fois plus élevé que le CO<sub>2</sub>. Le reste est principalement lié aux émissions de méthane provenant de la fermentation des déjections (FAO, 2018). Les émissions des effluents ont une contribution plus importante à d'autres impacts environnementaux, notamment l'acidification, liée principalement aux émissions d'ammoniac.

Comme les stratégies nutritionnelles peuvent potentiellement agir à la fois sur les impacts environnementaux associés à la production des aliments et sur ceux liés à la gestion des effluents, elles sont donc parfaitement indiquées pour réduire ces impacts (McAuliffe *et al.*, 2017 ; Andretta *et al.*, 2018 ; Garcia-Launay *et al.*, 2018 ; de

<sup>1</sup> Cet article a fait l'objet d'une présentation aux 55<sup>e</sup> Journées de la Recherche Porcine (Lambert *et al.*, 2023).

**Encadré 1. Petit glossaire de l'évaluation des impacts environnementaux.**

**Analyse de cycle de vie (ACV) :** méthodologie normée d'évaluation des impacts potentiels sur l'environnement d'un produit au cours de son cycle de vie (voir encadré 3).

**Analyse d'incertitudes :** analyse de la propagation des incertitudes, c'est-à-dire le degré de méconnaissance, des données d'entrées sur les résultats de l'étude (Leroy & Lasvaux, 2013).

**Analyse de sensibilité :** analyse de l'effet de la variabilité de valeurs d'entrée données, intrinsèques au système contrairement aux incertitudes, sur les résultats de l'étude.

**Anthropogénique :** lié aux activités humaines.

**Changement d'utilisation des terres (CUT) :** modification de l'affectation des sols, comme la déforestation et le retournement des prairies permanentes, associées à des émissions de GES, qui peuvent être attribuées aux produits utilisant ces terres dans le cadre de calculs d'impacts changement climatique.

**Crédit carbone :** certificat de réduction des émissions de GES, pouvant être échangé dans un système de marché du carbone, mis en place pour fournir des incitations financières à la réduction du changement climatique.

**Empreinte carbone :** terme générique se référant à la comptabilité des émissions de GES d'un produit ou d'une activité, exprimée en équivalents CO<sub>2</sub>.

**Gaz à effet de serre (GES) :** gaz absorbant le rayonnement infra-rouge de la surface terrestre et contribuant au réchauffement de l'atmosphère. Ils incluent le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) mais aussi la vapeur d'eau et certains composés fluorés émis par les activités industrielles. Ces gaz sont caractérisés par leur potentiel de réchauffement global qui quantifie leur pouvoir réchauffant et est exprimé en équivalents CO<sub>2</sub>. Le potentiel de réchauffement à long terme déterminé par le GIEC pour le N<sub>2</sub>O est 298 fois plus important que celui du CO<sub>2</sub> et 34 fois pour le CH<sub>4</sub> (IPCC, 2021).

**Impacts environnementaux :** Conséquences potentielles des activités humaines sur l'environnement (écosystèmes, biodiversité, réchauffement climatique, santé humaine, épuisement des ressources...), quantifiables par ACV et réparties en différentes catégories d'impacts dont notamment :

- **Impact changement climatique (CC) :** potentiel de réchauffement climatique d'ici 100 ans associé à l'émission de GES et exprimées en équivalent CO<sub>2</sub> ;
- **Acidification :** potentiel d'acidification des sols et des milieux aquatiques, les rendant toxiques aux formes de vie. Il est principalement lié aux émissions d'ammoniac ;
- **Eutrophisation :** potentiel de dégradation d'un milieu aquatique lié à l'accumulation de nutriments, provoquant l'augmentation de la production de biomasse et la réduction de l'oxygénation du milieu. Il est associé principalement au phosphore en eaux douces et à l'azote en milieu marin.

**Méthode de caractérisation :** jeu de facteurs de caractérisation, qui associent une valeur d'impact environnemental à un élément émis ou une ressource consommée.

Quelen *et al.*, 2021). C'est le cas de la réduction du taux de protéines associée à une supplémentation en acides aminés (AA) des aliments qui peut agir sur ces deux leviers (encadré 2). 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 CC élevé, comme le tourteau de soja (Garcia-Launay *et al.*, 2014 ; Simongiovanni *et al.*, 2022). Elle permet également de réduire l'excrétion azotée et donc les émissions de N<sub>2</sub>O, tout en maintenant les performances de croissance.

Cette revue fait un état des lieux des connaissances de l'influence de

la stratégie de baisse du taux protéique des aliments pour porcs 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 (Lambert *et al.*, 2023). Elle aborde ensuite les limites des connaissances actuelles et les perspectives d'application de la stratégie.

### 1. La baisse du taux de protéines alimentaire pour réduire les impacts de la production d'aliment

La baisse du taux protéique 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 ; Garcia-Launay *et al.*, 2014). 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 ; Shurson & Kerr, 2023). À l'échelle du territoire français, Guilbaud *et al.* (2021) ont déterminé que l'application d'une stratégie de baisse du taux protéique de deux points de pourcentage comparative-ment à une situation initiale de formulation moindre coût, permettrait d'économiser 450 000 t par an de tourteaux de soja d'import, soit une baisse de 20 %.

Les tourteaux, surtout ceux associés à un changement d'utilisation

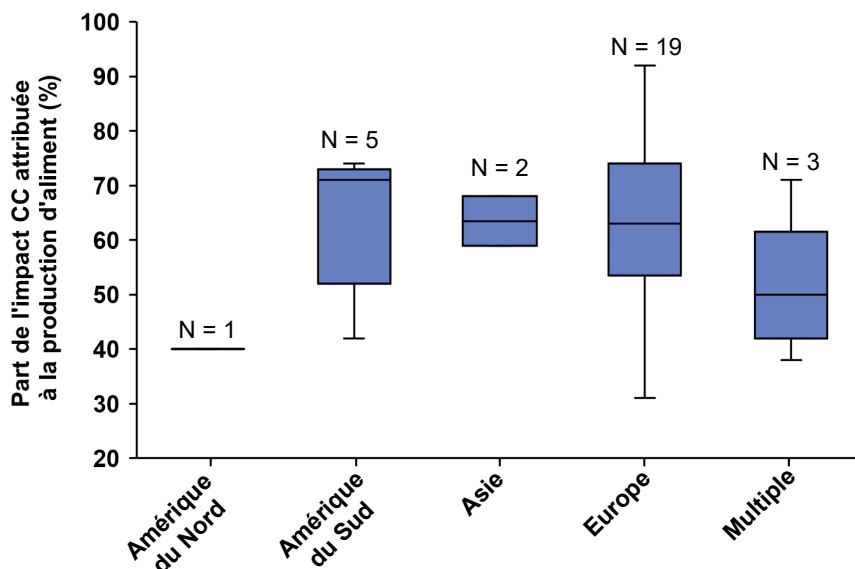
des terres (CUT), présentent en général un impact CC plus élevé que les céréales (tableau 1). Les huiles et les AA de synthèse présentent également une empreinte carbone importante (Wilfart *et al.*, 2016) mais représentent moins de 5 % des régimes (Lin *et al.*, 2013 ; Simongiovanni *et al.*, 2022), limitant leur contribution.

L'effet de la baisse de la teneur en protéines sur les impacts environnementaux de la production d'aliment a été un des premiers sujets des analyses de cycle de vie (ACV, encadré 3) 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 du taux protéique quand le CUT est pris en compte mais pas toujours quand il est exclu. De plus, la réduction d'impact rapportée est assez faible (moins de 5 % par point de baisse du taux protéique). Une des limites de ces études est l'utilisation de témoins éloignés des pratiques du terrain.

Afin d'évaluer des stratégies de baisses de la teneur en protéines plus pratiques, une méta-analyse avec calcul de l'impact CC a été récemment réalisée (Simongiovanni *et al.*, 2022). La base de données établie par Cappelaere *et al.* (2021) a servi de point de départ et la base de données finale 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 taux de matière azotée totale (MAT) :

- une réduction de 33 kg/t de tourteau de soja (figure 2) ;
- une augmentation de 24 kg/t des céréales totales ;

Figure 1. Variabilité inter-publications selon le contexte géographique de la contribution de l'aliment à l'impact changement climatique dans les analyses de cycle de vie de la production porcine (adapté de Andretta *et al.*, 2021).

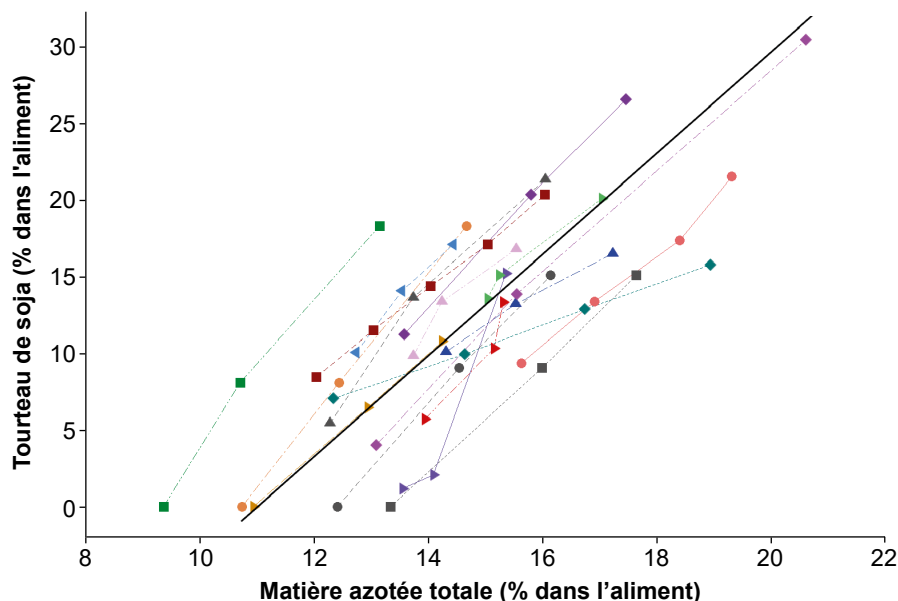


- une augmentation de 2,9 kg/t des AA de synthèse.

L'impact CC des aliments expérimentaux, calculé avec la base de données GFLI (GFLI, 2019) est réduit de 65 kg d'équivalents CO<sub>2</sub> (éqCO<sub>2</sub>) par tonne d'aliment pour un point de réduction du taux protéique, soit une réduction de 8 %, 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, puisque la source de protéines est quasi exclusivement le soja. Les bénéfices de la baisse de la teneur en protéines à l'échelle de l'aliment dépendent des matières premières disponibles et utilisées, de l'impact environnemental de leur production dans le contexte géographique considéré, du choix des bases de données d'évaluation environnementale, et du

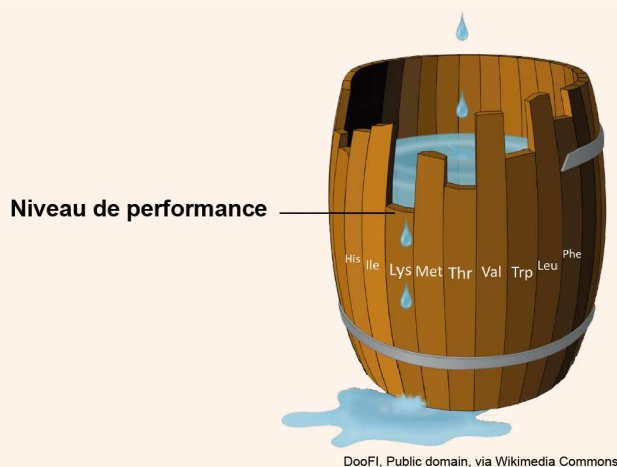
Figure 2. Effet du niveau de matière azotée totale de l'aliment sur l'inclusion de tourteaux de soja (Simongiovanni *et al.*, 2022).



Méta-analyse basée sur 10 expériences et 17 aliments porc charcutier.

**Encadré 2. Glossaire de la baisse de la teneur en protéines.**

**Acide aminé (AA) limitant** : AA déficitaire qui détermine le niveau de performance des animaux. Ainsi, l'augmentation de la teneur en cet AA augmente les performances jusqu'à ce qu'un autre AA devienne limitant. Ce concept peut être illustré par le tonneau de Liebig où chaque planche représente le niveau de couverture des besoins en AA.

**Représentation du concept d'acide aminé limitant par le tonneau de Liebig**

**Acide aminé (AA) co-limitant** : quand la teneur en protéines des aliments est réduite et que des AA libres sont utilisés, plusieurs AA peuvent être limitants au même moment, c'est-à-dire qu'ils permettent le même niveau de performance, on les appelle alors co-limitants.

**Acide aminé (AA) essentiel / non essentiel** : AA qui ne peut pas être synthétisé par l'animal et est donc uniquement fourni par l'alimentation. Les AA non essentiels peuvent eux être synthétisés par l'organisme à partir d'autres AA. Les AA semi-essentiels ne peuvent quant à eux être synthétisés qu'à partir d'AA essentiels.

**Matière azotée totale (MAT)** : estimation de la teneur en protéines, utilisée très largement pour les aliments du bétail, correspondant à 6,25 fois la teneur en azote (N).

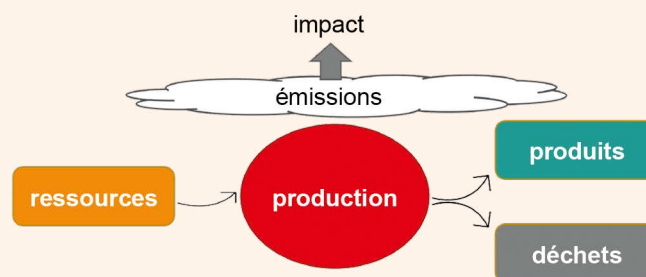
**Tableau 1. Valeurs de référence de l'impact changement climatique d'une sélection d'ingrédients utilisés dans les aliments porc.**

Ingrédient	Base de données	Origine	Impact changement climatique (kg éqCO <sub>2</sub> /kg)
Maïs	GFLI (2022)	France	0,33
Blé		France	0,39
Tourteau de soja		Brésil	4,27
Tourteau de soja		US	0,54
Tourteau de soja		Mix Europe <sup>1</sup>	1,99
Tourteau de colza		France	0,47
Tourteau de colza		Mix Europe <sup>1</sup>	0,50
Huile de soja		Brésil	13,0
Huile de soja		Mix Europe <sup>1</sup>	8,18
L-Lys HCl		Agribalyse 3.1 (ADEME, 2022)	France
L-Lys HCl	Chine		9,15

<sup>1</sup> Moyenne pondérée des différentes origine utilisées en Europe.

**Encadré 3. La méthodologie analyse de cycle de vie (ACV) et son application à l'élevage porcin.****Principes**

La méthodologie ACV est une méthode d'évaluation environnementale dont le cadre de travail est fixé par les normes ISO 14040 et 14044 (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b). Elle y est définie comme la « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ». Le cycle de vie d'un produit s'étend de l'acquisition des matières premières et ressources jusqu'à la gestion des déchets et de la fin de vie du produit (traitement, recyclage, mise au rebut). Les ressources consommées et les éléments émis dans la biosphère sont convertis en catégories d'impact.



**Représentation schématique du principe de l'analyse de cycle de vie.**

**Étapes***1) Définition des objectifs et du champ d'étude*

L'ACV peut évaluer l'impact d'un produit, comparer des systèmes de production ou évaluer des stratégies d'atténuation des impacts. De la définition du produit à étudier et de l'objectif de l'ACV découlent les limites du système considéré et l'unité fonctionnelle (kg de produit par ex.). Ces limites sont à la fois spatiales et temporelles, et incluent inclusion ou non des émissions indirectes comme celles liées au CUT. La gestion de la multifonctionnalité (un processus menant à plusieurs produits qui requiert une allocation) est aussi à définir ici. Cette étape nécessite de poser des hypothèses sur les éléments les plus influents du système et ceux négligeables.

*2) Inventaire de cycle de vie*

Les ressources consommées et les émissions sont calculées grâce à des collectes de données ou des modèles qui caractérisent la production.

*3) Évaluation des impacts*

Les méthodes de caractérisation, basées sur des modèles scientifiques et établies par des panels d'experts, proposent des facteurs de conversion des substances émises ou extraites en impacts potentiels sur l'environnement. Une méthode de caractérisation est choisie pour agréger les flux de l'inventaire en catégories d'impacts environnementaux.

*4) Interprétation*

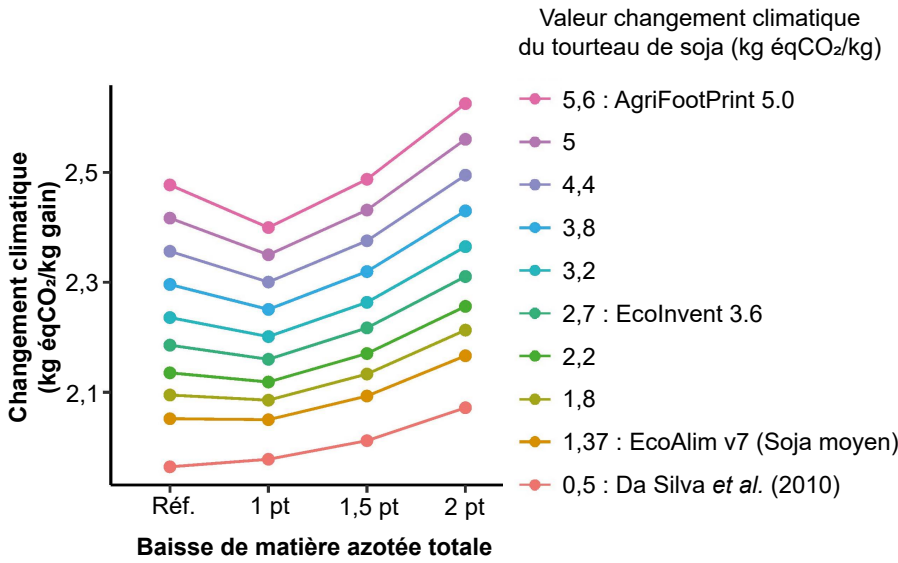
Les résultats de l'ACV sont analysés et la méthodologie utilisée est évaluée (validité des hypothèses faites, influence des choix méthodologiques faits à l'étape 1), ainsi que les valeurs retenues lors de l'inventaire. Les outils d'analyse sont notamment l'analyse de sensibilité, d'incertitudes ou des contributions. Le but final est de tirer les conclusions de l'étude et d'établir les recommandations qui en découlent, tout en tenant compte de ses limites et du champ d'interprétation.

**Application à l'élevage porcin**

Les guides LEAP (Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership) de la FAO fixent un cadre adapté et spécifique au secteur pour la réalisation des ACV. Pour la production porcine, le guide principal est celui concernant les chaînes d'approvisionnement de porc (FAO, 2018). Le guide sur la production d'aliment est aussi applicable (FAO, 2016). Ces guides concernent plutôt l'évaluation d'un système donné que l'évaluation d'une stratégie de réduction des impacts environnementaux. Le guide concernant les additifs pour l'alimentation animale fournit des éléments pour l'évaluation de stratégies alimentaires (FAO, 2020).

En élevage, les ACV s'arrêtent généralement en sortie de ferme avec le kg de poids vif comme unité fonctionnelle. Les recommandations du guide LEAP porcin indiquent la nécessité d'inclure les reproducteurs et l'étape du naissage (inclus dans les limites de système ou porcelet comme intrant). Un arbre de décision pour choisir la méthode adaptée pour inclure la gestion des effluents est fourni. Néanmoins, par soucis de simplification du travail, certaines ACV publiées dans la littérature scientifique excluent ces étapes. Dans le cadre d'évaluation de stratégies alimentaires, la réalisation d'une ACV en sortie d'usine d'aliment, plus simple à réaliser, peut être une approche préliminaire pour évaluer l'intérêt environnemental de ces stratégies. Les méthodes de caractérisation proposent un nombre élevé d'indicateurs, la méthode EF3.1 de la Commission européenne en a 14 par exemple (Andreas Bassi et al., 2023). Les cahiers des charges des instances gouvernementales demandent aux acteurs de la filière voulant diffuser l'ACV de leur production de produire tous les indicateurs d'une méthode mais tous ne sont pas toujours inclus dans les ACV de stratégies d'atténuation réalisées par les scientifiques. Ceux les plus étudiés en élevage sont le changement climatique mais aussi l'acidification et l'eutrophisation des milieux car le secteur a une contribution importante à ces impacts. L'utilisation des terres et la consommation d'énergie fossiles sont aussi des indicateurs clé.

**Figure 3.** Effet de la valeur d'impact du tourteau de soja et de la baisse de matière azotée totale sur l'impact changement climatique par kg de gain de poids vif (Cappelaere et al., 2022a).



Les valeurs sans référence correspondent à des paliers intermédiaires pour l'analyse de sensibilité et non à des valeurs d'ACV publiées.

potentiel de réduction de la teneur en protéines, influencé par les pratiques nutritionnelles actuelles (Cappelaere et al., 2021 ; Yang et al., 2022). Ainsi, l'intérêt de la baisse de la teneur en protéines pour réduire l'impact de l'aliment est amoindri quand peu de matières premières à fort impact sont utilisées dans le scénario de référence et/ou quand peu de matières premières

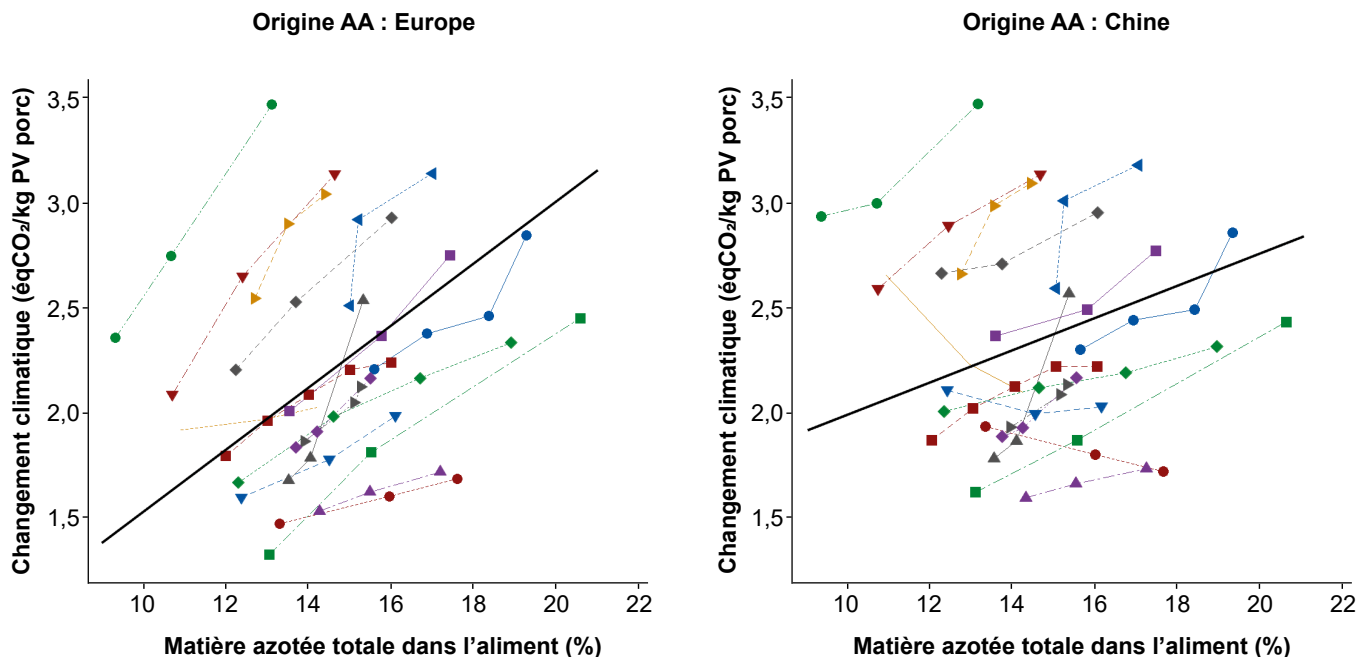
à faible impact sont disponibles pour les remplacer. Dans le contexte français avec en pratique des sources de protéines diversifiées, la réduction de l'impact de l'aliment par la baisse de la teneur en protéines est plus limitée qu'ailleurs en Europe ou au Brésil, et surtout dépendante de la réduction 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 eqCO<sub>2</sub>/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 la teneur en protéines pour les valeurs extrêmes (Cappelaere et al., 2022b, figure 3). Guilbaud et al. (2021) ont obtenu des résultats similaires.

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'impact CC d'un aliment porc s'ils sont d'origine européenne et 10,7 % s'ils sont d'origine chinoise. Le niveau de réduction de l'impact CC de la production de porc avec la baisse de la teneur en protéines dépend donc de l'origine des AAs : 148 kg eqCO<sub>2</sub> par tonne de PV par point de baisse de MAT avec des AA européens contre seulement 76 kg eqCO<sub>2</sub> en utilisant des AA d'origine chinoise (Simongiovanni et al., 2022 ; figure 4).

Les bénéfices marginaux de la baisse du taux protéique sur l'impact CC de l'aliment sont réduits pour des baisses très importantes de la teneur

**Figure 4.** Effet 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 et Chine (Simongiovanni et al., 2022)



Méta-analyse basée sur 10 expériences et 17 aliments porc charcutier.

en protéines ; 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, 2022b).

## 2. La baisse de la teneur en protéines alimentaires pour réduire les impacts de la gestion des effluents

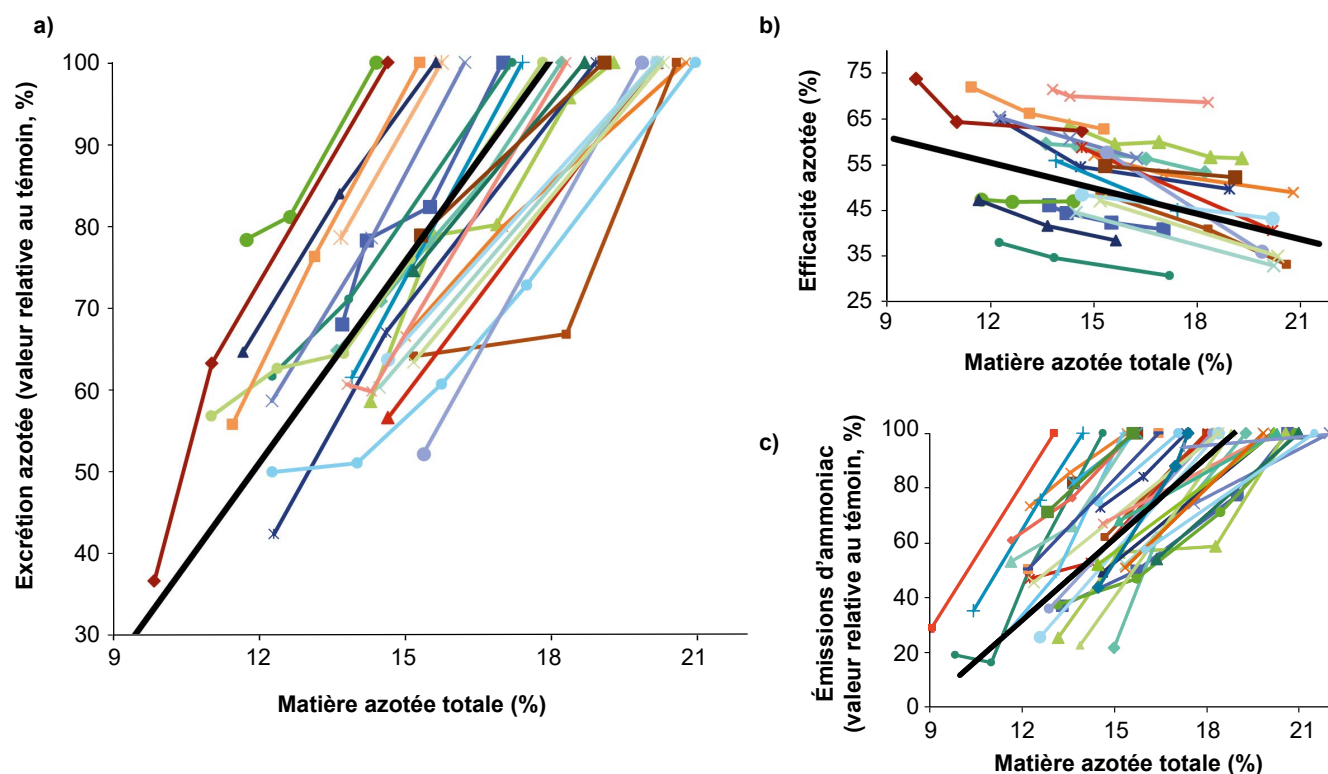
En plus de l'impact sur la composition de l'aliment, la réduction du taux protéique dans les aliments permet une meilleure efficacité azotée et donc une moindre excrétion d'azote à l'échelle de l'élevage. Cette réduction passe principalement par la réduction de l'excrétion urinaire, fraction de l'azote des effluents rapidement dégradé en ammoniac qui réagit et/ou se volatilise, 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 8 % de l'excrétion N totale, grâce à une réduction de 10 % de l'excrétion N urinaire et menant à une réduction de 10 % des émissions d'ammoniac par point de baisse de la teneur en MAT (Cappelaere *et al.*, 2021 ; figure 5).

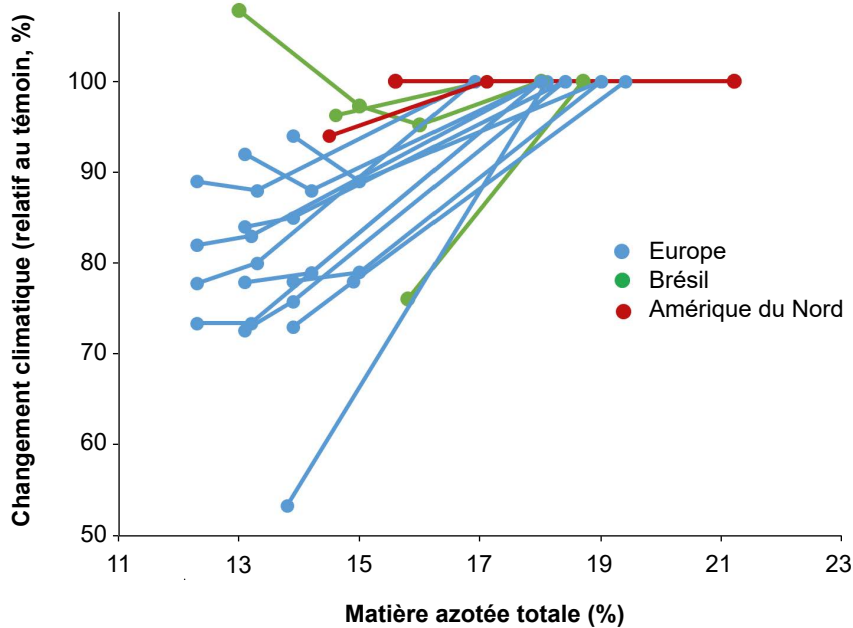
Des modèles de prédiction robustes validés par des mesures en élevage ont pu être établis pour les émissions d'ammoniac jusqu'au stockage des effluents, facilitant l'estimation des effets des stratégies alimentaires. Pour l'ammoniac, l'utilisation de facteurs d'émission fixes reposant sur l'azote ammoniacal, pouvant être adapté au contexte climatique et aux pratiques d'élevage, produit des résultats fiables (Cederberg *et al.*, 2013). On peut ainsi calculer qu'à l'échelle de la France, une réduction du taux protéique de deux points de pourcentage permettrait de réduire les émissions d'ammoniac de 5 400 t (Guilbaud *et al.*, 2021). En revanche, les émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), sont difficilement mesurables et très variables, surtout au champ (effet de la nature du sol et des cultures, de la météo,

des pratiques culturales, des pratiques d'épandage) où la majeure partie des émissions a lieu (Wang *et al.*, 2021). Ainsi, 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 car peu de facteurs plus précis existent (Van Der Weerden *et al.*, 2021) mais ils comportent une forte incertitude. En utilisant cette méthodologie, on peut calculer qu'une réduction du taux protéique d'un point de pourcentage chez le porc charcutier permettrait de réduire les émissions de N<sub>2</sub>O de 10 % (Millet *et al.*, 2022). Des travaux sont en cours pour confirmer ou invalider les facteurs d'émissions de composés azotés disponibles et préciser si la baisse de la teneur en MAT les modifie ou si l'hypothèse de facteurs d'émission fixes est validée. L'amélioration de la prédiction de l'impact de la baisse du taux protéique sur les émissions de N<sub>2</sub>O est cruciale car le N<sub>2</sub>O contribue à hauteur de 8,2 % aux émissions de GES du porc (FAO, 2013). Les émissions de méthane (CH<sub>4</sub>) ne sont pas non plus à négliger du fait de la contribution importante du CH<sub>4</sub> aux émissions de GES du porc : 3 % seulement liés à la fermentation

**Figure 5.** Effet 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).



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



entérique mais 19 % liés 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  $\text{CH}_4$  entérique (Atakora et al., 2011) sauf quand des matières premières alternatives riches en MAT. Deux publications mettent en évidence l'importance du contexte géographique 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 à haute teneur en protéines par rapport aux pratiques actuelles, entre 18 et 20 %, surestimant les bénéfices possibles de la stratégie de réduction du taux protéique. Cela s'explique notamment par l'utilisation d'un témoin n'utilisant pas d'acides aminés libres (Garcia-Launay et al., 2014 ; Kebreab et al., 2016).

### 3. Évaluation globale de l'effet de la baisse de la teneur en protéines alimentaires par analyse de cycle de vie en sortie de ferme

L'ACV en sortie de ferme est l'outil approprié pour évaluer une stratégie multifactorielle comme la baisse du taux protéique des aliments. Six études relatives à ce sujet ont été publiées en production porcine avant 2018 (Ogino et al., 2013 ; Garcia-Launay et al., 2014 ; Cherubini et al., 2015 ; Kebreab et al., 2016 ; Monteiro et al., 2016, 2017).

Leurs résultats concernant la réduction de l'impact CC par kg de porc produits, exprimés relativement au traitement témoin, sont rapportés à la figure 6. Toutes les études rapportent un impact positif de la stratégie, avec parfois un plafonnement ou une dégradation pour des baisses importantes de la teneur en protéines. Deux publications mettent en évidence l'importance du contexte géographique 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 à haute teneur en protéines par rapport aux pratiques actuelles, entre 18 et 20 %, surestimant les bénéfices possibles de la stratégie de réduction du taux protéique. Cela s'explique notamment par l'utilisation d'un témoin n'utilisant pas d'acides aminés libres (Garcia-Launay et al., 2014 ; Kebreab et al., 2016).

Les ACV publiées utilisent soit une hypothèse de performances constantes, soit une approche par modélisation qui prend en compte l'effet éventuel de la réduction du taux protéique sur les performances. Cependant, les modèles actuels (van Milgen et al., 2008 ; NRC,

2012) produisent des performances stables, même avec des teneurs en protéines très faibles, quand l'apport en acides aminés respecte les besoins définis dans le modèle. Leur utilisation est donc proche d'une hypothèse de performances constantes. Or, une variation des performances pourrait affecter les résultats de l'ACV : augmentation de l'utilisation de ressources par kg de produit, réduction de l'excrétion azotée plus faible qu'attendue. Il est donc important de comprendre l'effet des stratégies de baisse de la teneur en protéines sur les performances et de correctement les inclure dans les ACV. Expérimentalement, l'effet de la baisse de la teneur en protéines sur les performances de croissance est contradictoire. Des baisses de taux protéique modérées par rapport à la situation actuelle (deux à trois points de pourcentage) n'affectent pas les performances (Cappelaere et al., 2021). Cependant, des réductions beaucoup plus importantes de taux protéique peuvent entraîner une baisse du dépôt protéique (Gonzalo et al., 2022a) en particulier lorsque les apports en AA essentiels ne sont pas correctement assurés, de par un défaut de formulation ou une méconnaissance des besoins des animaux pour les acides aminés nouvellement limitants. La méta-analyse conduite par Simongiovanni et al. (2022) a permis de prendre en compte les effets sur les performances, mesurées expérimentalement, dans la réalisation d'ACV par kg de poids vifs. Cette méta-analyse a mis en évidence que les faibles variations de performances n'ont pas affecté l'effet positif de la stratégie sur l'impact CC (figure 4).

Concernant l'impact CC, les résultats des ACV en sortie de ferme reflètent généralement les variations d'impact des aliments, de par leur contribution majeure. Une augmentation de l'impact CC de l'aliment est ainsi difficilement compensée par une réduction de l'impact de la gestion des effluents (Garcia-Launay et al., 2014 ; Cappelaere et al., 2022a, 2022b).

Une ACV en sortie de ferme 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 (Braconi *et al.*, 2023), avec une hypothèse de performances constantes et en utilisant les équations de prédiction des émissions azotées comme proposées par Cappelaere *et al.* (2021). Les résultats sont présentés dans le **tableau 2**. Avec une origine européenne des AA, l'impact CC du porc à l'engrais du témoin est évalué à 3,71 kg  $\text{eqCO}_2/\text{kg}$  PV contre 3,85 kg  $\text{eqCO}_2/\text{kg}$  PV avec une origine chinoise des AA. La diminution du taux protéique des aliments réduit l'impact CC de  $8,1 \pm 1,7$  % avec des AA européens et 5,7 % avec des AA chinois. L'acidification et l'eutrophisation ont aussi été calculées et sont plus élevées avec les AA chinois que européens. La baisse de la teneur en MAT les réduit de 9 et 8 % respectivement avec des AA européens et chinois.

#### 4. Lacunes méthodologiques et manque de connaissances pour évaluer les conséquences des stratégies de baisse de teneur en protéines

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.

#### ■ 4.1. Variation des performances de croissance

Certains travaux récents (Garcia-Launay *et al.*, 2018), basés sur des modèles individus-centrés permettent de représenter les effets de l'alimentation sur les performances, la production entérique de méthane et les émissions des effluents avec plus de précisions. Néanmoins, la limite au maintien des performances de croissance des animaux avec une baisse importante du taux protéique reste à explorer (Cappelaere *et al.*, 2022c). Les besoins en leucine, histidine, phénylalanine et tyrosine ont jusqu'à présent été surtout étudiés chez le porcelet (Gloaguen *et al.*, 2013, 2014 ; Soumeh *et al.*, 2015 ; Wessels *et al.*, 2016) et les ratios utilisés sont issus de la composition chimique du gain ou de modélisations. Une meilleure connaissance de ces besoins est nécessaire pour formuler des aliments à très faible teneur en MAT où ces acides aminés deviendront co-limitants. De plus, l'établissement d'un besoin en acides aminés non essentiels, exprimé tel quel ou sous forme d'un besoin en protéines ou en azote, est poursuivi depuis de nombreuses années mais il n'y a pas de consensus aujourd'hui (Lenis *et al.*, 1999 ;

NRC, 2012 ; Mansilla *et al.*, 2017). Il est donc nécessaire de répondre à ces interrogations expérimentalement et d'implémenter ces réponses dans les modèles de prédiction des performances pour mieux représenter les points de rupture associés à des niveaux très bas en protéines.

Dans le futur, un compromis pourrait être à trouver entre baisse de performance et réduction des impacts environnementaux (Domingues *et al.*, 2019), pour permettre l'augmentation de l'utilisation de coproduits par exemple (Mackenzie *et al.*, 2016). 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).

#### ■ 4.2. Quantification des émissions

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). Les facteurs d'émission pour le  $\text{N}_2\text{O}$  sont très incertains car très variables et difficiles à mesurer. 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). Des initiatives existent pour proposer de nouveaux

**Tableau 2.** Effet d'une réduction d'un point de pourcentage de matière azotée totale (MAT) des aliments et de l'origine 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  $\text{eqCO}_2$  ; incluant ou non le changement d'utilisation des terres (CUT)), acidification terrestre et d'eau douce (AC, mol  $\text{eqH}^+$ ) et eutrophisation terrestre (EU, mol  $\text{eqN}$ ) (Braconi *et al.*, 2023).

Traitements	AA d'origine européenne			AA d'origine chinoise			Δ Europe vs Chine	
	Témoin	Basse MAT	Δ témoin vs basse MAT	Témoin	Basse MAT	Δ témoin vs basse MAT	Témoin	Basse MAT
CC, kg $\text{eqCO}_2$	3,71	3,41	- 8,1 %	3,85	3,63	- 5,7 %	3,8 %	+ 6,5 %
CC hors CUT, kg $\text{eqCO}_2$	2,64	2,63	- 0,4 %	2,78	2,85	2,5 %	+ 5,3 %	+ 8,4 %
AC, mol $\text{eqH}^+$	0,068	0,062	- 9,0 %	0,069	0,064	- 7,6 %	+ 1,9 %	+ 3,4 %
EU, mol $\text{eqN}$	0,300	0,273	- 9,0 %	0,303	0,278	- 8,3 %	+ 1,0 %	+ 1,8 %

modèles prenant en compte les facteurs de variation principaux (Beltrán *et al.*, 2021 ; Van Der Weerden *et al.*, 2021). Les modèles de prédiction des émissions de CH<sub>4</sub> disponibles sont plus précis que ceux concernant le N<sub>2</sub>O et l'azote plus généralement (Cederberg *et al.*, 2013).

### ■ 4.3. Inclusion de l'épandage dans les limites de système

La prise en compte de l'effet de la stratégie d'alimentation sur les émissions après épandage des effluents, en particulier celles de N<sub>2</sub>O, est aussi un point clé, étant donné que 25 % de l'impact CC de la production porcine est lié aux émissions au champ (FAO, 2018). Afin d'éviter de compter deux fois les émissions liées à l'épandage des lisiers porcins (émissions directes au champ et émissions déjà comptabilisées dans les inventaires des matières premières fertilisées en partie avec du lisier), il est nécessaire de représenter correctement l'utilisation des effluents (Rigolot *et al.*, 2009). La méthode généralement appliquée consiste à faire l'hypothèse simplificatrice que tout le lisier est épandu sur les cultures destinées à l'alimentation des porcs. Cela s'accompagne généralement d'une économie en fertilisant, considérant que tout l'azote ammoniacal du lisier permet de remplacer celui qui aurait été apporté par du fertilisant minéral. Cette méthode s'accompagne plutôt de risques de sous-comptage puisqu'elle ne prend pas en compte les pratiques de fertilisation dans le contexte d'étude et la valorisation réelle des lisiers. Pour l'évaluation de baisses de teneur en protéines, il est important de définir si la réduction de l'excrétion azotée des porcs, menant à une baisse la disponibilité en N organique sur le territoire, est associée à une augmentation de l'utilisation de fertilisant minéral ou à une réduction des excédents. Différents cadres méthodologiques ont été établis permettant de mieux prendre en compte ces effets (Espagnol *et al.*, 2018 ; Leip *et al.*, 2019 ; Ahmed *et al.*, 2020).

### ■ 4.4. Prise en compte de l'incertitude dans les ACV

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 celles-ci sont rarement prises en compte dans les ACV réalisées qui manquent trop souvent d'analyses de sensibilité et d'incertitude. Cependant, beaucoup de ces défis méthodologiques 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 baisse de la teneur en protéines et perspectives

Les stratégies de baisse du taux protéique alimentaire 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 des sols ou la concurrence alimentation animale vs alimentation humaine. Les méthodologies proposées pour évaluer ces points sont à mobiliser (De Boer *et al.*, 2011 ; Laisse *et al.*, 2018). La baisse du taux protéique a l'avantage de réduire très significativement les impacts eutrophisation et acidification en plus de diminuer l'impact CC. En pratique, il est possible de réduire le taux de protéines de un à trois 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 géographiques et économiques, appliquer une réduction du taux protéique peut engendrer des surcoûts liés aux prix des matières premières de substitution (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 du taux protéique alimentaire 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 du taux protéique alimentaire 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 teneur en protéines à une autre stratégie plus globale, comme la formulation multi-objectif, favorisant l'inclusion d'ingrédients à faible empreinte carbone comme les coproduits, pour aller au-delà de la réduction de l'utilisation de soja comme seul levier de réduction de l'empreinte carbone de l'aliment (Garcia-Launay *et al.*, 2018 ; Méda *et al.*, 2021). D'autre part, l'alimentation multiphase et la nutrition de précision à l'échelle de l'individu permettent d'aller plus loin dans la baisse du taux protéique afin de maximiser les bénéfices environnementaux (Pomar *et al.*, 2014 ; Andretta *et al.*, 2018). Ces stratégies ont déjà été testées en combinaison avec des résultats positifs (Lagadec *et al.*, 2016 ; Pomar *et al.*, 2021). 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 du taux protéique des aliments est une stratégie actuellement efficace pour réduire l'impact CC 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 transition vers des

matières premières non issues de la déforestation, poussée par l'interdiction à l'échelle européenne de l'importation de ressources issues de terres déforestées après 2020 (European Parliament, 2023), réduira fortement l'intérêt de la baisse de la teneur en protéines pour réduire l'empreinte carbone de l'aliment, surtout quand ces matières premières ne seront plus associées à la déforestation selon les recommandations de calcul actuelles (British Standards Institute, 2011), puisque son mode d'action est de réduire l'utilisation de soja associé à de la déforestation. La baisse du taux protéique réduit également de façon efficace l'excrétion azotée et les émissions de GES qui en découlent, comme celles de N<sub>2</sub>O. 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 du taux protéique alimentaire afin d'identifier les critères de succès et les points limites dans des contextes variés en termes de

disponibilité, d'impacts environnementaux 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 du taux protéique alimentaire 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.

## Contributions des auteurs

Léa CAPPELLAERE, William LAMBERT, Josselin LE COUR GRANDMAISON, Aude SIMONGIOVANNI et Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY ont

conceptualisé la revue, collecté la littérature appropriée et relu et approuvé la version finale. LC, WL et AS ont rédigé la première version. LC et MP ont édité les versions suivantes. MP a acquis les fonds pour ce projet et a supervisé la réalisation de ce travail.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Léa Cappelaere portant sur l'« évaluation environnementale des stratégies de baisse de protéines chez les porcs à l'engrais », réalisée à l'université Laval (Québec, Canada) sous la direction de Marie-Pierre Létourneau-Montminy et financée par le programme Agri-Science d'Agriculture et Agroalimentaire Canada dans le cadre du Partenariat canadien pour l'agriculture, et par METEX Noovistago, le Centre de recherche en sciences animales de Deschambault, l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Olymel SEC et le Centre de développement du porc du Québec inc.

## Références

- ADEME (2022). *Agribalyse, la base de données environnementale de référence sur des produits agricoles et alimentaires*. <https://agribalyse.ademe.fr/>
- Ahmed, M., Ahmad, S., Waldrip, H. M., Ramin, M., & Raza, M. A. (2020). Whole farm modeling: A systems approach to understanding and managing livestock for greenhouse gas mitigation, economic viability and environmental quality. In: H.M. Waldrip, P.H. Pagliari & Z. He (Eds.), *Animal Manure* (pp. 345-371). ASA Special Publication. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub67.c25>
- Andreas Bassi, S., Biganzoli, F., Ferrara, N., Amadei, A., Valente, A., Sala, S., & Ardenete, F. (2023). Updated characterisation and normalisation factors for the environmental footprint 3.1 method. EUR 31414 EN. *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2760/798894>
- 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(9), 1990-1998. <https://doi.org/10.1017/s1751731117003159>
- 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. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 750733. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.750733>
- 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. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 412-421. <http://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.029>
- Beltrán, I., Van Der Weerden, T. J., Alfaro, M., Amon, B., De Klein, C. a. M., Grace, P. R., Hafner, S. D., Hassouna, M., Hutchings, N. J., Król, D., Leytem, A. B., Noble, A., Salazar, F., Thorman, R. E., & Velthof, G. (2021). DATAMAN: A global database of nitrous oxide and ammonia emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *Journal of Environmental Quality*, 50(2), 513-527. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20186>
- 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 de la Recherche Porcine, 55, 255-260. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2023/environnement/env02.pdf>
- British Standards Institute (2011). PAS 2050: 2011. *Specification for the assessment of the life cycle greenhouse emissions of goods and services*. British Standards Institute, London. <https://biolatina.com/wp-content/uploads/2018/08/PAS2050.pdf>
- Cappelaere, L., Van Milgen, J., Syriopoulos, K., Simongiovanni, A., & Lambert, W. (2021). *Quantification des bénéfices de la baisse de protéine sur les rejets azotés des porcs à l'engrais : approche par méta-analyse*. Journées de la Recherche Porcine, 53, 323-328. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2021/environnement/env02.pdf>
- Cappelaere, L., Létourneau-Montminy, M.-P., Lambert, W., Martin, N., & Garcia-Launay, F. (2022a). *Évaluation par analyse de cycle de vie de stratégies de baisse du taux protéique dans les aliments pour porcs charcutiers*. Journées de la Recherche Porcine, 54, 215-220. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2022/environnement/env02.pdf>
- Cappelaere, L., Létourneau-Montminy, M.-P., & Garcia-Launay, F. (2022b). Evaluation of low crude protein diets for fattening pigs using two life cycle assessment modelling approaches. *Animal Science Proceedings*, 13, 547-548. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.423>
- Cappelaere, L., Van Milgen, J., Syriopoulos, K., Simongiovanni, A., Lambert, W., & Létourneau-Montminy, M.-P. (2022c). Effect of reducing dietary crude protein on growth performance of fattening pigs: A meta-analysis. *Journal of Animal Science*, 100, 81-81. <http://doi.org/10.1093/jas/skac064.130>

- 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. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000785>
- 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. *Environment, Development and Sustainability*, 17(6), 1313–1328. <http://doi.org/10.1007/s10668-014-9607-9>
- 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. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(5), 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.08.007>
- de Quelen, F., Brossard, L., Wilfart, A., Dourmad, J.-Y., & Garcia-Launay, F. (2021). Eco-friendly feed formulation and on-farm feed production as ways to reduce the environmental impacts of pig production without consequences on animal performance. *Frontiers in Veterinary Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.689012>
- 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. *Agricultural Systems*, 184, 102899. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102899>
- Domingues, J. P., Gameiro, A. H., Bonaudo, T., Tichit, M., & Gabrielle, B. (2019). Exploring trade-offs among indicators of performance and environmental impact in livestock areas. *Regional Environmental Change*, 19(7), 2089–2099. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01538-z>
- EMEP/EEA (2016). Air Pollutant Emission Inventory guidebook (3. B Manure Management). EEA Report No 21/2016. [EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016 — European Environment Agency \(europa.eu\)](https://www.eea.europa.eu/en/air-pollutant-emission-inventory-guidebook-2016)
- EMEP/EEA (2019). Air pollutant emission inventory guidebook (3. B Manure Management). EEA Report No 13/2019. [EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 — European Environment Agency \(europa.eu\)](https://www.eea.europa.eu/en/air-pollutant-emission-inventory-guidebook-2019)
- Espagnol, S. (2021). Implementation of mitigation strategies in livestock chain: the case of “Label bas carbone” for pig production in France. *Animal Science Proceedings*, 12(3), 250–252. <http://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.01.004>
- 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. 11<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Assessment of Food (LCA Food 2018) in conjunction with 6<sup>th</sup> LCA AgriFood Asia and 7<sup>th</sup> International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI), 16–20. <https://ifip.asso.fr/documentations/1932-feed-eco-design-how-to-make-a-good-decision-part-2-rebound-effects-of-eco-feed-production/>
- European Environment Agency (2022). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2020 and inventory report 2022*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-1>.
- European Parliament (2023). *Regulation (EU) 2023/1115 of the European Parliament and of the Council of 31 May 2023 on the making available on the Union market and the export from the Union of certain commodities and products associated with deforestation and forest degradation and repealing Regulation (EU) No 995/2010* <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1115/oj>
- FAO (2016). *Environmental performance of animal feeds supply chains: Guidelines for assessment*. FAO, 184p. <http://www.fao.org/partnerships/leap/publications/en/>
- FAO (2018). *Environmental performance of pig supply chains: Guidelines for assessment (Version 1)*. FAO, 176p. <https://www.fao.org/3/i8686en/i8686EN.pdf>
- FAO (2020). *Environmental performance of feed additives in livestock supply chains. Guidelines for assessment: Guidelines for assessment*. FAO, 162p. <https://doi.org/10.4060/CA9744EN>
- García-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. *Livestock Science*, 161, 158–175. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.11.027>
- García-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(11), 1298–1309. <https://doi.org/10.1017/S0007114518002672>
- Gloaguen, M., le Floc'h, N., Primot, Y., Corrent, E., & van Milgen, J. (2013). Response of piglets to the standardized ileal digestible isoleucine, histidine and leucine supply in cereal-soybean meal-based diets. *Animal*, 7(6), 901–908. <https://doi.org/10.1017/S1751731112002339>
- Gloaguen, M., Le Floc'h, N., Primot, Y., Corrent, E., & van Milgen, J. (2014). Performance of piglets in response to the standardized ileal digestible phenylalanine and tyrosine supply in low-protein diets. *Animal*, 8(9), 1412–1419. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001360>
- GFLI (2019). Global Feed LCA Institute: *Database of animal feed production*. LCA Feed database. <https://globalfeedlca.org/gfli-projects/past-data-in-projects/>
- GFLI (2022). Global Feed LCA Institute: *Database of animal feed production*. LCA Feed database. <https://globalfeedlca.org/gfli-database/>
- Gonzalo, E., Labussière, E., Simongiovanni, A., Lambert, W., & van Milgen, J. (2022a). Effect of dietary protein level on energy utilization in growing pigs. 7<sup>th</sup> EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, Granada. *Animal - science proceedings*. 13(3), 311–312. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.065>
- 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. 7<sup>th</sup> EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, Granada. *Animal - science proceedings*. 13(3), 360–362. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.105>
- 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 de la Recherche Porcine, 53, 279–284. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2021/ecosocio/ec02.pdf>
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.08.017>
- International Organization for Standardization (2006a). *Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework*. ISO 14040:2006
- International Organization for Standardization (2006b). *Environmental Management: Life Cycle Assessment; Requirements and Guidelines*. ISO 14044:2006
- IPCC (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- IPCC (2021). *The Sixth Assessment Report: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S1751731110002041>
- 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. *Journal of Animal Science*, 94(6), 2664–2681. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9036>
- Lagadec, S., Roy, H., Landrain, P., Hassouna, M., & Lecuelle, S. (2016). *Effet d'une alimentation multiphase à bas taux protéique sur les performances les rejets et les émissions gazeuses chez le porc à l'engraissement*. Journées Recherche porcine, 48, 165–170. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2016/environnement/e1.pdf>
- Laisse, S., Baumont, R., Dusart, L., Gaudré, D., Rouillé, B., Benoit, M., & Peyraud, J. L. (2018). L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. *INRA Productions Animales*, 31(3), 269–288. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355>

- Lambert, W., Cappelaere, L., Le Cour Grandmaison, J., Simongiovanni, A., & Létourneau-Montminy, M.P. (2023). *Revue de l'influence de la nutrition protéique sur l'impact changement climatique de la production porcine : état des lieux et perspectives*. Journées de la Recherche Porcine, 55, 261-268. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2023/environnement/env03.pdf>
- 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. *Journal of Environmental Management*, 241, 293-304. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.059>
- Lenis, N. P., van Diepen, H. T. M., Bikker, P., Jongbloed, A. W., & van der Meulen, J. (1999). Effect of the ratio between essential and nonessential amino acids in the diet on utilization of nitrogen and amino acids by growing pigs. *Journal of Animal Science*, 77(7), 1777-1787. <https://doi.org/10.2527/1999.7771777X>
- Leroy, Y., & Lasvaux, S. (2013). De la gestion des incertitudes en analyse de cycle de vie. *Marché et Organisations*, 17(1), 65-82. <https://doi.org/10.3917/MAORG.017.0065>
- Lin, X., Azain, M. & Odle, J. (2013). Lipids and lipid utilization in swine. In: L.I. Chiba (Ed.), *Sustainable Swine Nutrition* (pp 59-79). <https://doi.org/10.1002/9781118491454.ch3>
- Mansilla, W. D., Htoo, J. K., & de Lange, C. F. M. (2017). Nitrogen from ammonia is as efficient as that from free amino acids or protein for improving growth performance of pigs fed diets deficient in nonessential amino acid nitrogen. *Journal of Animal Science*, 95(7), 3093-3102. <https://doi.org/10.2527/JAS.2016.0959>
- Mackenzie, S. G., Leinonen, I., Ferguson, N., & Kyriazakis, I. (2016). Can the environmental impact of pig systems be reduced by utilising co-products as feed? *Journal of Cleaner Production*, 115, 172-181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.074>
- McAuliffe, G.A., Takahashi, T., Mogensen, L., Hermansen, J.E., Sage, C.L., Chapman, D. V., & Lee, M.R.F. (2017). Environmental trade-offs of pig production systems under varied operational efficiencies. *Journal of Cleaner Production* 165, 1163-1173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.191>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100024>
- 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. *Livestock Science*, 149(3), 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.07.012>
- Millet, S., Le Cour Grandmaison, J., Lambert, W., Simongiovanni, A., Demeyer, P., Laanen, L., Zhuang, S., de Cuyper, C., Doudidah, L., Aluwe, M., & Brusselman, E. (2022). *Effet d'une baisse du taux protéique sur les performances, la qualité de carcasse et les émissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre durant la période d'engraissement*. Journées de la Recherche Porcine, 54, 249-250. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2022/environnement/env08.pdf>
- 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. *Journal of Animal Science*, 94, 4832-4847. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0529>
- Monteiro, A., Dourmad, J., & Pozza, P.C. (2017). Life cycle assessment as a tool to evaluate the impact of reducing crude protein in pig diets. *Ciencia Rural*, 47(6). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20161029>
- 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(12), 1972-1983. <https://doi.org/10.1017/S1751731111001078>
- Nemecek, T., Schnetzer, J., & Reinhard, J. (2016). Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crop inventories. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1361-1378. <http://doi.org/10.1007/s11367-014-0712-7>
- 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. *Journal of Cleaner Production*, 140(2), 399-409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.071>
- NRC (2012). *Nutrient Requirements of Swine* (Eleventh Revised Edition). The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13298>.
- 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 Science and Plant Nutrition*, 59(1), 107-118. <http://doi.org/10.1080/00380768.2012.730476>
- 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(5), 704-713. <https://doi.org/10.1017/s1751731114000408>
- Pomar, C., Andretta, I., & Remus, A. (2021). Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 742220. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.742220>
- 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 de la Recherche Porcine, 41, 281-282. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2009/enviro/penv03.pdf>
- Seradj, A.R., Balcells, J., Morazan, H., Alvarez-Rodriguez, J., Babet, 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. *Animal Feed Science and Technology*, 245, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.09.005>
- Shurson, G.C. & Kerr, B.J. (2023). Challenges and opportunities for improving nitrogen utilization efficiency for more sustainable pork production. *Frontiers in Animal Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1204863>
- 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. 7<sup>th</sup> EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, Granada. *Animal - science proceedings*. 13(3), 384. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.124>
- Soumeh, E. A., van Milgen, J., Sloth, N. M., Corrent, E., Poulsen, H. D., & Nørgaard, J. V. (2015). The optimum ratio of standardized ileal digestible leucine to lysine for 8 to 12 kg female pigs. *Journal of Animal Science*, 93(5), 2218-2224. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8699>
- Van Der Weerden, T. J., Noble, A., De Klein, C. a. M., Hutchings, N. J., Thorman, R. E., Alfaro, M., Amon, B., Beltrán, I., Grace, P., Hassouna, M., Król, D., Leytem, A. B., Salazar, F., & Velthof, G. (2021). Ammonia and nitrous oxide emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *Journal of Environmental Quality*, 50(5), 1005-1023. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20259>
- 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. *Animal Feed Science and Technology*, 143(1-4), 387-405. <https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2007.05.020>
- 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(4), 770. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040770>
- Wessels, A. G., Kluge, H., Mielenz, N., Corrent, E., Bartelt, J., & Stangl, G. I. (2016). Estimation of the leucine and histidine requirements for piglets fed a low-protein diet. *Animal*, 10(11), 1803-1811. <https://doi.org/10.1017/S1751731116000823>
- Wilfart, A., Espagnol, S., Dauguet, S., Tailleur, A., Gac, A., & Garcia-Launay, F. (2016). ECOALIM: A dataset of environmental impacts of feed ingredients used in french animal production. *PLoS ONE*, 11(12), e0167343. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167343>
- Yang, Z., Hung, Y., Jang, J.C., Urriola, P.E., Johnston, L.J., & Hurson, G.C. (2022). 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. *Journal of Animal Science*, 100, 27-28. <https://doi.org/10.1093/jas/skac064.044>

## Résumé

La production porcine est responsable d'environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'élevage mondial et doit réduire ses impacts. Ces émissions de GES, comptabilisées en sortie de ferme, sont liées à la production d'aliment et la gestion des effluents, pour 60 % et 30 % respectivement. La réduction du taux de protéines alimentaires peut agir sur ces deux sources. Cette revue synthétise les connaissances actuelles sur les bénéfices de cette stratégie pour réduire l'impact changement climatique (CC) en relation avec les matières premières utilisées et la réduction des émissions azotées. Une analyse de cycle de vie (ACV) à l'échelle de l'aliment montre que le CC est réduit de 8 % par point de réduction du taux protéique, grâce au remplacement des matières premières plus impactantes (produits du soja). Ces bénéfices sont dépendants des matières premières disponibles et utilisées, du choix des bases de données d'évaluation environnementale et du contexte technico-économique. La modélisation des émissions azotées en fonction des performances, mise à jour par méta-analyse, permet d'effectuer une ACV en sortie de ferme. Une réduction du CC par kg de porc de 10 % pour un point de baisse du taux protéique est atteignable. Cependant, des lacunes méthodologiques et de connaissances subsistent pour correctement évaluer cette stratégie : facteurs d'émission du N<sub>2</sub>O, prise en compte de l'utilisation des effluents pour la fertilisation, effet sur les performances zootechniques. Par ailleurs, des évolutions structurelles sont nécessaires pour faciliter la mise en pratique, comme la rémunération des externalités positives.

## Abstract

### **Protein nutrition and reduction of the carbon footprint of pig production: current state and perspectives**

*Pig production is responsible for approximately 10% of greenhouse gases (GHG) emitted by all livestock in the world and strives to reduce its impacts. These GHG emissions are linked to feed production and manure management, contributing to 60% and 30% of farmgate emissions, respectively. Reducing dietary crude protein (CP) can lower emissions from both sources. The goal of this review was to summarize current knowledge on the impact of this strategy on GHG emissions related to differences in feed composition and the decrease in nitrogen emissions. Life cycle assessment (LCA) of feed production shows that the carbon footprint can be reduced by 8% for every 1-percentage-point decrease in dietary CP. This effect was obtained by reducing inclusion of feedstuffs with the highest impact (soybean meal & soy oil). However, these benefits depend strongly on the available and usable feedstuffs, the choice of environmental assessment databases and the economic context. Nitrogen emission modelling based on performance, updated recently by meta-analytical approaches, allows a complete assessment with farm-gate LCA. Decreasing GHG emissions by approximately 10% per kg of pig for a 1-percentage-point decrease in dietary CP was shown to be possible. Methodological and knowledge gaps remain to assess this strategy correctly: N<sub>2</sub>O emission factors, taking into consideration the use of manure as a fertilizer, and better understanding of breakoff point in animal performance. Structural changes will also be a key to facilitate adoption of this practice, such as paying pig farmers for positive externalities.*

CAPPELAERE, L., LAMBERT, W., LE COUR GRANDMAISON, J., SIMONGIOVANNI, A., & LÉTOURNEAU-MONTMINY, M.-P. (2024). Nutrition protéique du porc et changement climatique : état des lieux et perspectives. *INRAE Productions Animales*, 37(1), 7554.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.1.7554>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.