

Evaluation par analyse de cycle de vie de stratégies de baisse du taux protéique dans les aliments pour porcs charcutiers

Léa CAPPELAERE (1, 2), Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY (1), William LAMBERT (3),
Nicolas MARTIN (3), Florence GARCIA-LAUNAY (2)

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

(2) PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint Gilles, France

(3) METEX NØØVISTAGO, 32 rue Guersant, 75017 Paris, France

lea.cappelaere.1@ulaval.ca

Evaluation par analyse de cycle de vie de stratégies de baisse du taux protéique dans les aliments pour porcs charcutiers

La réduction de la teneur en matières azotées (MAT) des aliments est une stratégie reconnue pour réduire les impacts environnementaux des porcs. Cette étude évalue les impacts environnementaux de baisses de MAT permises par les acides aminés (AA) libres autorisés dans le contexte français actuel. Les baisses de MAT explorées sont -1, 1,5 et 2 points, avec ou sans soja, en fournissant tous les AA libres ou uniquement juste la valine, avec deux origines de lysine. Une analyse de cycle de vie a été réalisée pour deux limites de système : LIM1 (production d'aliments, bâtiment, stockage du lisier) et LIM2 (LIM1 + épandage et économie de fertilisant minéral). Malgré un effet significatif du niveau de MAT et de l'apport en AA ($P < 0,05$) sur les performances, les variations numériques sont faibles et l'apport en AA n'a pas d'effet sur les impacts environnementaux. La baisse de MAT augmente la demande en énergie et réduit l'acidification ($P < 0,05$). Le changement climatique diminue dans le scénario -1 point de MAT sans soja et augmente dans les autres ($P < 0,05$). Ces impacts sont plus élevés avec la lysine chinoise qu'européenne ($P < 0,05$). L'eutrophisation diminue avec une baisse d'1 point de MAT, puis augmente ($P < 0,05$). L'occupation des sols augmente avec la baisse de MAT et l'interdiction du soja ($P < 0,05$). Les limites de système ont un effet significatif ($P < 0,05$) sur tous les impacts sauf l'occupation des sols et interagissent avec le niveau de MAT pour l'acidification ($P < 0,05$). Une réduction importante de MAT réduit les impacts liés aux émissions azotées mais augmente ceux des aliments, sans contrainte environnementale de formulation.

Life cycle assessment (LCA) of low-crude protein strategies for fattening pigs

Reducing dietary crude protein (CP) is a recognized strategy to reduce environmental impacts of fattening pigs. This study evaluated environmental impacts of dietary CP reductions made possible by the availability of new feed-grade amino acids (AA), in the current French context. Dietary CP reductions of -1.0, -1.5 and -2.0 percentage points compared to current practices (Ref), allowing the incorporation of soybean products or not, providing all of the feed-grade AA available or only until Val, with two lysine origins were explored for a restricted two-phase feeding plan. Life cycle assessment was performed with two sets of system boundaries: LIM1 (feed production, housing, slurry storage) and LIM2 (LIM1 + spreading and savings in mineral fertilisers). Despite a significant effect of CP reduction and the AA provided on growth performances ($P < 0.05$), absolute variations were small. Energy demand increased and acidification decreased after CP reduction ($P < 0.05$). Climate change decreased after a 1-percentage-point reduction in CP and exclusion of soybean but increased after CP reduction in the other scenarios ($P < 0.05$). These two impacts were higher when using Chinese lysine ($P < 0.05$) compared to European lysine. Eutrophication decreased after CP was reduced by 1 percentage point but increased when it was reduced further ($P < 0.05$). Land use increased after CP reduction and exclusion of soybean ($P < 0.05$). A deficit in AA had no effect on environmental impacts. System boundaries had a significant effect ($P < 0.05$) on all impacts except land use, with an interaction with CP level for acidification ($P < 0.05$). Very low CP strategies reduce impacts primarily caused by nitrogen emissions but increase feed-production impacts if diets are not formulated according to environmental constraints.

INTRODUCTION

L'élevage porcin, comme les autres élevages, contribue à divers impacts environnementaux comme le changement climatique (CC), l'eutrophisation des eaux marines et côtières (EUT) et l'acidification des sols (AC) (de Vries et de Boer, 2010). La production des aliments et la gestion des effluents contribuent majoritairement à ces impacts (Dourmad *et al.*, 2014). La baisse de la teneur en matière azotée totale (MAT) dans les aliments pour porcs à l'engrais est une stratégie reconnue (IRPP, 2017) pour réduire les impacts de la production sans affecter les performances si les régimes sont équilibrés via l'incorporation d'acides aminés (AA) libres. En effet, la baisse de MAT réduit a) l'excrétion et les émissions d'N vers l'environnement, b) l'incorporation dans les aliments de matières premières riches en protéines, comme le tourteau de soja. Ces mécanismes sont bien documentés pour des baisses de MAT utilisant Lys, Thr, Met, Trp et Val libres (Cappelaere *et al.*, 2021). La disponibilité sur le marché de nouveaux AA permet de baisser la MAT à des niveaux dont les bénéfices environnementaux sont moins connus. L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode reconnue d'évaluation de stratégies de réduction des impacts environnementaux. Cependant, une diversité importante subsiste dans les choix méthodologiques faits. Certains travaux incluent par exemple l'épandage des effluents dans le périmètre de l'étude (Kebreab *et al.*, 2016 ; Monteiro *et al.*, 2016) quand d'autres s'arrêtent à l'étape de stockage des effluents (van Zanten *et al.*, 2017 ; Méda *et al.*, 2021), ce qui n'est pas neutre pour des stratégies qui modifient les contenus en N des effluents. De même, un choix contextualisé des données ACV des matières premières, notamment le tourteau de soja et les AA libres, forts contributeurs, est déterminant pour la robustesse de l'ACV.

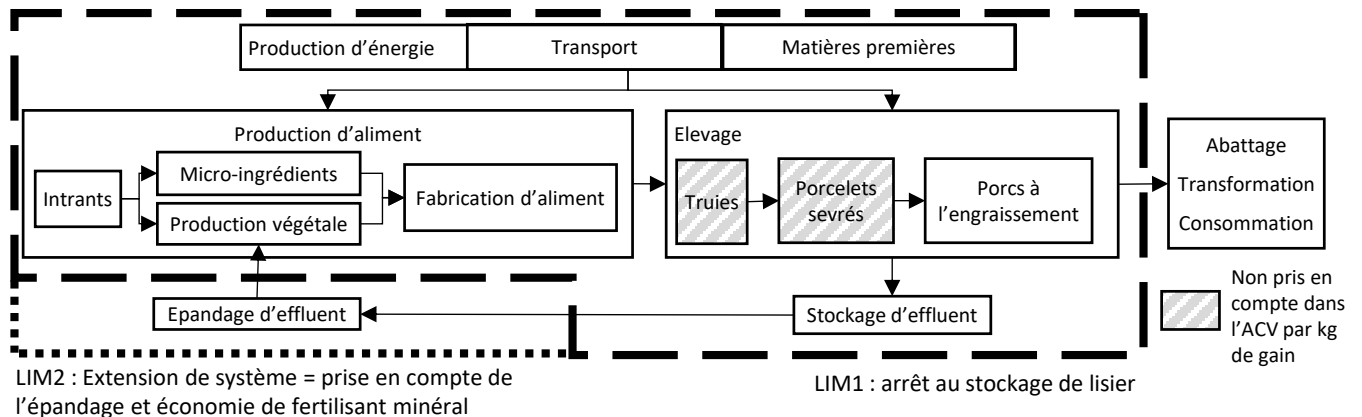


Figure 1 - Différentes limites de système prises en compte pour l'analyse de cycle de vie

Les impacts et méthodes de caractérisation retenus sont : CC (kg CO₂eq), AC (molH⁺eq) et EUT (g Neq) avec la méthode ILCD 2011, occupation des terres (m².an) avec la méthode CML 2001 et demande en énergie non renouvelable (MJ) avec la méthode CED V1.8. Une analyse économique a été réalisée en utilisant les prix des matières premières issues des notes de conjoncture IFIP et les données du marché du Porc Breton pour 4 contextes économiques (mai 2018, août 2019, novembre 2020 et mars 2021). Pour les nouveaux AA, les prix moyens ont été communiqués par METEX NØØVISTAGO.

1.2. Construction des scénarios alimentaires

Les 32 scénarios alimentaires ont été construits en croisant quatre niveaux de MAT, deux modalités d'apports des AA, deux modalités d'incorporation du soja et deux origines de la lysine :

Les objectifs de cette étude sont donc de réaliser une évaluation environnementale de nouvelles stratégies de baisse de MAT, en explorant différents facteurs de variation comme le périmètre de l'ACV, l'incorporation de tourteau de soja, l'apport en AA libres et l'origine de la lysine.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Méthodologie ACV

Une ACV en sortie de ferme a été réalisée en contexte français (Figure 1). Le système considéré est un atelier porcin naisseur-engraisseur dans lequel des porcs à l'engrais de type (Large White x Piétrain) x (Large White x Landrace) ont menés en cohorte de 30 à 116 kg sur caillebotis intégral avec stockage des effluents sous les animaux pendant l'engraisement puis en fosse extérieure découverte jusqu'à l'épandage. Ils reçoivent une alimentation biphasée rationnée avec changement d'aliment à 60 kg de poids vif. Deux options de limites de système en aval ont été considérées : gestion des effluents jusqu'au stockage uniquement (LIM1) ou prise en compte des émissions liées à l'épandage (LIM2). Pour LIM2, on considère également que le lisier permet de substituer du fertilisant minéral (75% pour N ; 100% pour le phosphore) ; on ne considère donc que l'accroissement d'émissions résultant de l'utilisation d'un fertilisant organique à la place des engrais minéraux. L'unité fonctionnelle principale retenue est le kg de gain de poids vif en engraisement, prenant en compte les impacts liés au fonctionnement de l'atelier d'engraisement (Figure 1), concerné par la stratégie de baisse de MAT. Les impacts par kg de poids vif en sortie de ferme, incluant ceux liés aux truies et aux porcelets, ont aussi été calculés pour mesurer les effets sur tout le cycle de production.

- Niveau de MAT : témoins (Ref) formulés avec un maximum de MAT fixé selon les normes actuelles (RMT Elevages & Environnement, 2016) ; baisses de 1,0 point (1pt), 1,5 point (1,5pt) et 2,0 points (2pt) formulées avec un maximum de MAT fixé par rapport aux niveaux obtenus pour Ref dans les différents scénarios ;
- Apport en AA : tous les AA essentiels (AAE) proposés à la formulation (tousAAE) vs formule obtenue avec tousAAE dont sont retirés L-Ile, L-Leu, L-His et L-Phe, pour créer un déficit en certains AA (deficitAA) et tester les effets d'une baisse de performances ;
- Incorporation de soja : pas de contrainte d'incorporation sur le soja (SOJA) vs. interdiction de l'incorporation des produits du soja pour 1pt, 1,5pt et 2pt (noSOJA) ;
- Origine de la lysine : incorporation exclusive de L-Lys HCl produite en France (FR) ou en Chine (CN).

Les scénarios tousAAE ont été formulés à moindre coût dans quatre contextes économiques contrastés (mai 2018, août 2019, novembre 2020 et mars 2021), en utilisant les valeurs nutritionnelles des tables INRA-AFZ (2004), afin de respecter les contraintes nutritionnelles et d'incorporation. Les aliments ont été formulés avec une teneur en énergie nette de 9,5 MJ/kg, une teneur en Lys digestible iléale standardisée (DISLys) à 95% des besoins du profil moyen de femelles en début de phase (8,56 et 7,40 g/kg respectivement en croissance et finition) et les AAE au minimum au niveau du profil en AA d'InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008). Le croisement des deux limites de système, des 32 scénarios alimentaires et des quatre contextes économiques produit 256 observations.

1.3. Calcul des inventaires de cycle de vie

Les inventaires de cycle de vie et les calculs d'impacts environnementaux ont été réalisés grâce à un modèle individu centré (Cadéro *et al.*, 2018) simulant les performances techniques, économiques et environnementales d'un atelier d'engraissement en fonction des pratiques de l'éleveur et du potentiel de croissance des animaux. Ce modèle inclut le modèle InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008) pour la modélisation des performances à partir de profils individuels (Vautier *et al.*, 2013). Les émissions au bâtiment, au stockage et à l'épandage de NH₃, N₂O, NO₃, NO_x et CH₄ sont calculées respectivement avec les méthodes EMEP Tier 2, IPCC Tier 2, McAuliffe *et al.* (2017), CITEPA (2021) et Rigolot *et al.* (2010). Les données ACV des matières premières proviennent de la base EcoAlim, sauf pour la L-Lys HCl (donnée communiquée par METEX NØØVISTAGO). Pour les nouveaux AA sans données EcoAlim, celles de la L-Valine ont été utilisées. EcoInvent v3.4 a été utilisée pour les processus d'arrière-plan.

1.4. Analyse des résultats

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel R, avec un modèle ANOVA (package *car*) et l'observation comme individu statistique. Les données par tonne d'aliment (coût, impacts environnementaux) sont une moyenne pondérée par l'ingéré des aliments croissance et finition. Les variables explicatives utilisées sont la baisse de MAT, le déficit ou non en AA, l'incorporation de soja et l'origine de la lysine. Aucune interaction n'a été conservée car non significatives. Pour les données de performance techniques et économiques, les variables explicatives retenues sont celles influençant la composition nutritionnelle des aliments : baisse de MAT, AA fournis et leur interaction. Pour les impacts environnementaux par kg de gain, toutes les variables explicatives ont été conservées (baisse de MAT, déficit en AA, incorporation de soja, origine de la lysine, limites de système). Les interactions d'ordre deux significatives ont été conservées : baisse de MAT et incorporation de soja, baisse de MAT et limites de système.

Une analyse de sensibilité du CC par kg de gain à la valeur CC du tourteau de soja pour les différents niveaux de MAT a été réalisée pour les scénarios tousAAE x SOJA x FR x LIM2. La gamme de valeurs utilisée couvre l'étendue des données disponibles pour des sojas avec ou sans déforestation : de 0,5 (da Silva *et al.*, 2010) à 5,6 kg CO₂eq (AgriFootPrint 5.0).

2. RESULTATS

2.1. Composition des aliments

Les aliments Ref ont une teneur en MAT de 16% en croissance (maximum fixé) et entre 14,55 et 14,88% en finition selon le

contexte économique. Les traitements deficitAA ont un déficit en Ile pour tous les niveaux de baisse de MAT, allant jusqu'à un ratio DIS Ile:Lys de 48% pour un besoin à 60% et un déficit en Leu pour l'aliment croissance 2pt x noSOJA (96% pour un besoin à 100% SID Leu:Lys). La baisse de MAT augmente l'incorporation de céréales au détriment des co-produits (Figure 2). Pour les scénarios noSOJA, le tourteau de soja est remplacé principalement par du tourteau de colza. Pour les scénarios SOJA, l'incorporation de tourteau de soja diminue avec une baisse d'un point de MAT puis ré-augmente avec les baisses suivantes de MAT, remplaçant des matières premières locales comme les co-produits de céréales (remoulages de blé) et les tourteaux de colza et de tournesol. L'incorporation de L-Lys HCl est en moyenne de 4,9 et 4,3 g/kg en croissance et finition respectivement pour les aliments Ref contre 5,4 et 4,9 g/kg pour les aliments 2pt. L'incorporation de L-Ile intervient dès la baisse d'un point de MAT, celle de L-Leu dans certains aliments 2pt. L-His et L-Phe n'entrent pas dans les formules.

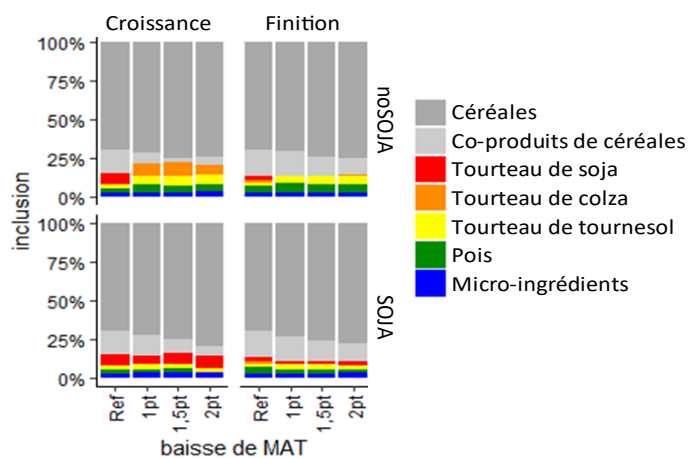


Figure 2 – composition moyenne des aliments

2.2. Coût et impacts environnementaux des aliments

Aucun facteur n'a d'effet significatif sur le coût de l'aliment (Tableau 1), dû à la forte variabilité entre contextes économiques. Numériquement, il augmente avec la baisse de MAT pour les scénarios tousAAE mais reste stable pour les scénarios deficitAA. L'impact CC est plus élevé pour les traitements SOJA ($P = 0,01$) vs. noSOJA. Une tendance existe pour la variable baisse de MAT ($P = 0,07$) avec des effets numériques différents selon l'incorporation ou non de soja. Une baisse de 1 point de MAT n'affecte pas le CC quand le soja est autorisé et a tendance à le réduire quand il est interdit. Les baisses de 1,5 et 2 points de MAT augmentent l'impact CC dans les deux cas. Les aliments utilisant de la lysine chinoise ont un impact CC plus élevé que ceux utilisant de la lysine française ($P < 0,001$). La demande en énergie augmente avec la baisse de MAT ($P = 0,03$), en raison de la contribution plus importante des AA libres. Elle a aussi tendance à être plus élevée quand on utilise de la lysine chinoise ($P = 0,09$). L'AC et l'EUT augmentent avec la baisse de MAT ($P < 0,05$) en lien avec la contribution croissante des céréales. Ces impacts sont également plus élevés avec la lysine chinoise ($P < 0,05$). L'occupation des sols augmente avec la baisse de MAT et l'interdiction du soja ($P < 0,05$), en lien avec l'incorporation plus importante de céréales et de protéines métropolitaines qui ont une occupation des sols élevée.

2.3. Performances des animaux

La baisse de MAT, les AA fournis et leur interaction ont un impact significatif sur tous les paramètres de performance de

croissance (Tableau 2, $P < 0,05$) mais les variations numériques sont très faibles. Pour les scénarios tousAAE, la baisse de MAT améliore légèrement le gain moyen quotidien (GMQ) et l'indice de consommation (IC) mais dégrade le taux de muscle des pièces (TMP). Pour les scénarios deficitAA, les performances sont légèrement dégradées et le TMP diminue

plus rapidement. La baisse de MAT réduit les quantités d'N rejeté ($P < 0,05$) et le déficit en AA diminue sa réduction possible ($P < 0,05$). Aucun effet significatif n'a été relevé sur la marge par porc mais elle diminue numériquement avec la baisse de MAT et est plus élevée pour les scénarios deficitAA.

Tableau 1 – Coût et impacts environnementaux de l'aliment moyen d'engraissement selon l'incorporation de soja (avec : SOJA, sans : noSOJA), le niveau de baisse de MAT, les AA fournis et l'origine de la lysine

	Scénarios ¹	Baisse de MAT				AA fournis		Origine de la lysine	
		Ref	1pt	1,5pt	2pt	tousAAE	deficitAA	CN	FR
Coût, €/t	noSOJA	211 ^a	214 ^a	217 ^a	220 ^a	218 ^a	213 ^a	216 ^a	216 ^a
	SOJA	211 ^a	213 ^a	216 ^a	219 ^a	217 ^a	212 ^a	215 ^a	215 ^a
Changement climatique ^{2,4,6} , kg CO ₂ eq/t	noSOJA	555 ^{ab}	525 ^a	544 ^{ab}	557 ^{ab}	546 ^a	544 ^a	565 ^{bc}	526 ^a
	SOJA	555 ^{ab}	555 ^{ab}	575 ^{ab}	602 ^b	573 ^a	571 ^a	591 ^c	552 ^{ab}
Demande en énergie ^{3,5} , GJ/t	noSOJA	5,94 ^a	5,93 ^a	6,15 ^a	6,48 ^a	6,18 ^a	6,08 ^a	6,27 ^a	5,99 ^a
	SOJA	5,94 ^a	6,06 ^a	6,29 ^a	6,66 ^a	6,29 ^a	6,19 ^a	6,38 ^a	6,10 ^a
Acidification ^{3,4} , molH ⁺ eq/t	noSOJA	9,95 ^a	10,1 ^{ab}	10,5 ^{ab}	10,7 ^{ab}	10,3 ^a	10,3 ^a	10,5 ^{cd}	10,1 ^{ab}
	SOJA	9,95 ^a	10,2 ^{ab}	10,5 ^{ab}	10,9 ^b	10,4 ^a	10,4 ^a	10,5 ^{bd}	10,2 ^{ac}
Eutrophisation marine ^{3,4} , kg N _{eq} /t	noSOJA	5,61 ^{ab}	5,68 ^{abc}	5,87 ^{abc}	5,99 ^c	5,79 ^a	5,79 ^a	5,85 ^a	5,72 ^a
	SOJA	5,61 ^{ab}	5,58 ^a	5,79 ^{abc}	5,97 ^{bc}	5,74 ^a	5,74 ^a	5,8 ^a	5,67 ^a
Occupation des sols ^{3,6} , m ² .an/t	noSOJA	1350 ^a	1400 ^{ab}	1450 ^{bc}	1480 ^c	1420 ^{bd}	1420 ^{cd}	1420 ^{bd}	1420 ^{cd}
	SOJA	1350 ^a	1340 ^a	1400 ^{ab}	1440 ^{bc}	1380 ^{ac}	1380 ^{ab}	1380 ^{ac}	1380 ^{ab}

^{a-d} Les moyennes ajustées suivies de la même lettre au sein d'un groupe (incorporation de soja x baisse de MAT, incorporation de soja x AA fournis, incorporation de soja x origine de la lysine) ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey. ¹SOJA : soja autorisé ; noSOJA : incorporation de soja interdite pour les baisses de MAT ; Ref : niveau de MAT témoin ; tousAAE : pas de déficit en AA ; deficitAA : déficit en Ile et Leu ; CN : Chine ; FR : France. ²tendance ($P = 0,07$) du niveau de baisse de MAT. ³effet significatif ($P < 0,05$) du niveau de baisse de MAT. ⁴effet significatif ($P < 0,05$) de l'origine de la lysine. ⁵tendance ($P = 0,09$) de l'origine de la lysine. ⁶effet significatif ($P < 0,05$) de l'incorporation de soja.

Tableau 2 – Performances obtenues selon le niveau de baisse de MAT et les AA fournis

Scénarios ¹	tousAAE				deficitAA				P value			RSD
	Ref	1pt	1,5pt	2pt	Ref	1pt	1,5pt	2pt	MAT	AA	MAT x AA	
Ingéré, kg/j	2,320 ^{ab}	2,321 ^b	2,320 ^{ab}	2,319 ^a	2,320 ^{ab}	2,319 ^a	2,321 ^b	2,320 ^{ab}	0,033	1,0	<0,001	0,0024
IC, kg/kg	2,682 ^{bc}	2,679 ^{ab}	2,673 ^a	2,673 ^a	2,682 ^{bc}	2,684 ^{bc}	2,687 ^c	2,705 ^d	<0,001	<0,001	<0,001	0,0097
GMQ, kg/j	0,848 ^{bc}	0,848 ^{cd}	0,850 ^d	0,850 ^d	0,848 ^{bc}	0,847 ^{bc}	0,846 ^b	0,841 ^a	<0,001	<0,001	<0,001	0,0029
Poids final, kg	115,8 ^b	115,9 ^{bc}	116,0 ^{cd}	116,0 ^d	115,8 ^b	115,8 ^b	115,9 ^{bc}	115,6 ^a	<0,001	<0,001	<0,001	0,17
TMP (kg/100 kg)	57,52 ^e	57,41 ^d	57,34 ^c	57,28 ^c	57,52 ^e	57,32 ^c	57,14 ^b	56,84 ^a	<0,001	<0,001	<0,001	0,08
N rejeté, g/porc	3430 ^e	3073 ^d	2882 ^c	2699 ^a	3430 ^e	3072 ^d	2901 ^c	2744 ^b	<0,001	<0,001	<0,001	32
Marge, €/porc	21,12 ^a	20,12 ^a	19,65 ^a	18,69 ^a	21,12 ^a	21,2 ^a	20,6 ^a	19,7 ^a	0,41	0,37	0,96	6,7

^{a-e} Les moyennes ajustées suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey.

¹Ref : niveau de MAT témoin ; 1pt, 1,5pt et 2pt : baisse de MAT de 1, 1,5 et 2 points ; tousAAE : pas de déficit en AA ; deficitAA : déficit en Ile.

2.4. Analyse de cycle de vie

L'impact CC par kg de gain est augmenté de 4% entre Ref et 2pt pour les scénarios SOJA (Figure 3a ; $P = 0,07$). Pour les scénarios noSOJA, diminuer de 1 point la MAT réduit l'impact CC de 3 à 4%. Il augmente ensuite avec les baisses suivantes pour rejoindre un niveau égal au scénario Ref. L'impact CC est plus faible pour les scénarios sans soja ($P = 0,002$) et pour les scénarios utilisant de la lysine française ($P < 0,001$). L'impact CC est plus élevé avec LIM1 qu'avec LIM2 ($P < 0,001$), en raison du crédit pour économie de fertilisant minéral pour LIM2. La demande en énergie augmente avec la baisse de MAT (Figure 3b ; $P < 0,001$) en raison de la contribution croissante des AA libres. Elle est plus élevée quand on utilise de la lysine chinoise ($P = 0,012$). L'incorporation de soja n'a pas d'effet significatif ($P > 0,05$). La demande en énergie est plus élevée avec LIM1 qu'avec LIM2 ($P < 0,001$), pour les mêmes raisons que pour le CC. L'AC est impactée significativement par la baisse de MAT (Figure 3c ; $P < 0,001$), les limites de système choisies ($P < 0,001$) et leurs interaction ($P < 0,001$). Avec LIM1, la baisse de

MAT permet une diminution linéaire de l'AC de 6% par point de baisse. Avec LIM2, l'AC obtenue est 20% plus élevée qu'avec LIM1 et la réduction n'est plus que de 4% par point de baisse. L'AC est légèrement plus élevée pour les scénarios SOJA ($P = 0,002$) et avec la lysine chinoise ($P < 0,001$). L'EUT est réduite pour une baisse d'un point de MAT puis augmente (Figure 3d ; $P = 0,001$). L'origine de la lysine et l'incorporation de soja n'ont pas d'effet significatif. L'impact est 27% plus élevé quand l'épandage est pris en compte ($P < 0,001$). L'occupation des sols est significativement impactée uniquement par le niveau de MAT ($P < 0,001$), l'incorporation de soja ($P < 0,001$) et leur interaction ($P = 0,035$). Pour les scénarios SOJA, elle augmente à chaque niveau de baisse de MAT alors que pour les scénarios noSOJA, elle est stable entre Ref et 1pt puis augmente aux niveaux 1,5pt et 2pt. Les AA fournis (tousAAE vs deficitAA) n'ont aucun effet significatif sur les impacts environnementaux étudiés. Les impacts liés à l'atelier d'engraissement représentent, selon les impacts, entre 59 et 80% de l'impact total de la production porcine, avec une variation relative identique.

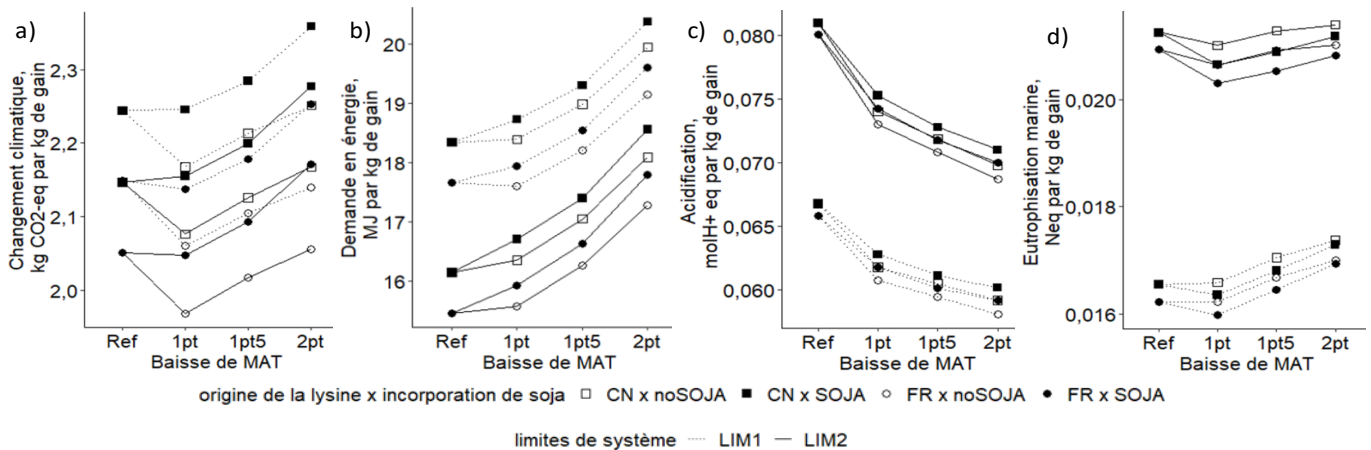


Figure 3 - effet du niveau de MAT (témoin : Ref, baisse de 1, 1,5, 2 points : 1pt, 1,5pt, 2pt), de l'incorporation de soja (avec : SOJA, sans : noSOJA), de l'origine de la lysine (Chine : CN, France : FR) et des limites de système (avant épandage : LIM1, après épandage : LIM2) sur le changement climatique (a), la demande en énergie (b), l'acidification (c) et l'eutrophisation marine (d) par kg de gain

2.5. Analyse de sensibilité aux valeurs changement climatique du tourteau de soja

Le CC par kg de gain de poids pour les scénarios Ref x tousAAE x FR x SOJA x LIM2 varie entre 1,98 et 2,48 kg CO₂-eq pour les valeurs de CC du tourteau de soja étudiées (Figure 4), contre 2,05 kg CO₂-eq avec EcoAlim. Avec la valeur la plus faible, toute baisse de MAT augmente le CC. Avec les autres valeurs, l'impact CC par kg de gain diminue pour la première baisse de MAT puis augmente pour les deux suivantes, mais l'amplitude de cette première diminution est fortement affectée par la valeur CC du soja. Une baisse d'un point de MAT accompagnée de l'interdiction du soja diminue le CC par kg de gain entre 1 et 21% selon la valeur du tourteau de soja.

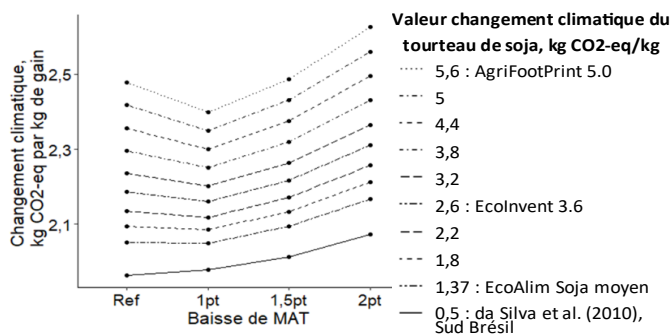


Figure 4 - Effet de la valeur changement climatique du tourteau de soja sur le lien entre baisse de MAT et impact changement climatique par kg de gain

3. DISCUSSION

3.1. Performances modélisées

La puissance du dispositif donne des effets statistiquement significatifs pour de faibles variations de performances. Quand tous les AA sont fournis, le GMQ augmente de 0,2% avec la baisse de MAT, ce qui s'explique par des pertes d'énergie plus faibles à bas niveau de MAT dans le modèle, augmentant le gain de poids des individus pour lesquels elle est limitante. De tels niveaux de MAT ont déjà été testés expérimentalement sans identifier d'effet de la baisse de MAT mais peu de références sont disponibles (Morales *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2020). La faible baisse de performance avec les traitements deficitAA (-0,8% de GMQ) est logique vu le faible déficit en Ile.

3.2. Analyse de cycle de vie

La baisse de MAT augmente tous les impacts des aliments sauf le CC, en raison de la baisse d'incorporation des coproduits et l'augmentation des céréales, les premiers ayant des impacts plus faibles du fait de l'allocation économique. La baisse de l'incorporation de soja est déterminante pour la réduction du CC des aliments puisque la seule diminution est observée entre les traitements Ref et 1pt avec interdiction du soja. Cela est en partie dû à la faible incorporation de tourteau de soja dès le scénario Ref (0 à 11% en croissance et 0 à 6% en finition), qui reflète les pratiques françaises. De plus, la baisse de MAT ne cause pas automatiquement une baisse du soja puisque son incorporation augmente pour les baisses de 1,5pt et 2pt de MAT. Cela s'explique par son profil en AA équilibré, plus intéressant quand le prix des AA libres devient contraignant, tel qu'observé précédemment (Garcia-Launay *et al.*, 2014). La valeur CC du soja utilisée a un impact majeur sur l'amplitude de l'effet observé. Les bénéfices de la baisse de MAT pour les impacts de la production d'aliment sont donc limités pour des contextes où l'utilisation de soja est déjà faible. Une baisse très importante de MAT limite la flexibilité permise par les AA libres et la réduction possible d'impacts environnementaux. L'origine de la lysine utilisée a un effet sur le niveau des impacts, surtout le CC, mais sans interagir avec le niveau de MAT. L'inclusion de L-Lys HCl augmente peu avec la baisse de MAT par rapport au niveau Ref. Il serait intéressant d'étudier l'effet de l'origine de tous les AA libres.

A l'échelle de l'atelier d'engraissement, les effets sur le CC reflètent les effets sur l'aliment, qui représente 65 à 73% de l'impact. L'AC, liée à plus de 60% aux émissions azotées, diminue logiquement avec chaque baisse de MAT, avec peu d'impact des autres facteurs de variation. Pour l'EUT, la baisse des émissions azotées est compensée par l'augmentation de l'impact de l'aliment. La demande en énergie et l'occupation des sols augmentent avec la baisse de MAT, la première en lien avec l'utilisation d'AA libres. Cette étude a trouvé des effets plus contrastés que les ACV précédentes évaluant la baisse de MAT chez le porc, en Europe (Mosnier *et al.*, 2011 ; Garcia-Launay *et al.*, 2014 ; Kebreab *et al.*, 2016). Cela s'explique par un niveau de MAT témoin plus bas et une plus grande diversité de matières premières offertes dans cette étude, résultant en un traitement témoin à plus faibles impacts. Ce résultat confirme la nécessité de bien contextualiser les évaluations

environnementales de stratégies alimentaires (Monteiro *et al.*, 2016). Une baisse importante de MAT dans le contexte actuel français est intéressante pour réduire l'AC mais affecte peu l'EUT. Pour le CC, la stratégie de formulation vis-à-vis du soja détermine les bénéfices de la baisse de MAT puisqu'une baisse de MAT sans réduction du soja a un impact négatif. L'utilisation d'AA locaux à moindre impact permet également d'améliorer la performance environnementale, particulièrement à de faibles teneurs en MAT où leur incorporation est élevée. La formulation multi-objectif (Garcia-Launay *et al.*, 2018) est une stratégie à favoriser afin de limiter les compromis entre diminution de l'excrétion azotée et augmentation des impacts de la production d'aliment.

Les deux limites de système n'ont pas mené à des conclusions divergentes sur l'effet de baisses de MAT mais affectent l'amplitude des effets, comme l'inclusion de l'épandage et de l'économie de fertilisant minéral mène à un niveau de base plus faibles pour le CC et la demande en énergie et plus élevées pour l'AC et l'EUT. Ces options sont deux extrêmes et une méthodologie contextualisée représentant fidèlement les pratiques de fertilisation serait idéale mais nécessite la mise en œuvre d'études complémentaires.

CONCLUSION

L'étude confirme l'intérêt de la baisse de MAT pour réduire l'impact AC de la production porcine. Les résultats sont plus contrastés pour les autres impacts, qui ont une contribution de l'aliment est plus importante. En effet, une réduction importante de MAT réduit les émissions azotées mais augmente les impacts environnementaux des aliments, en l'absence de contrainte environnementale de formulation. Dans le contexte étudié, le bénéfice de la baisse de MAT sur les émissions de nitrates est compensé par l'augmentation de l'impact de l'aliment dès un niveau de baisse de 1,5pt pour l'EUT. Une baisse de MAT de 1pt a permis de réduire l'impact CC quand couplée à une interdiction du soja, mais pas dans les autres scénarios de baisse. Un léger déficit en AA réduit suffisamment peu les performances de croissance pour ne pas avoir d'effet sur les impacts environnementaux. Cette étude confirme aussi, par ses résultats contrastés avec les études antérieures, la nécessité d'évaluer les effets des stratégies alimentaires sur les impacts environnementaux de la production dans différents contextes de formulation et de gestion des effluents.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cadéro A., Aubry A., Brossard L., Dourmad J., Salaün, Y., Garcia-Launay F., 2018. Modelling interactions between farmer practices and fattening pig performances with an individual-based model. *Animal*, 12, 1277–1286.
- Cappelaere L., le Cour Grandmaison J., Martin N., Lambert W., 2021. Amino Acid Supplementation to Reduce Environmental Impacts of Broiler and Pig Production: A Review. *Front. Vet. Sci*, 8, 799.
- CITEPA, 2021. Rapport OMINEA – 18ème édition. Paris, 1044 p. <https://www.citepa.org/fr/ominea/>.
- da Silva V.P., van der Werf H.M.G., Spies A., Soares S.R., 2010. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. *J. Environ. Manage.*, 91, 1831–1839.
- de Vries M., de Boer I.J.M., 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livest. Sci.*, 128, 1–11.
- Dourmad J.Y., Ryschawy J., Trousson T., Bonneau M., Gonzalez J., Houwers H.W.J., Hviid M., Zimmer C., Nguyen T.L.T., Morgensen L., 2014. Evaluating environmental impacts of contrasting pig farming systems with life cycle assessment. *Animal*, 8, 2027–2037.
- 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. *Brit. J. Nut.*, 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.
- INRA-AFZ, 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Sauvart D., Pérez J.M., Tran G., Coord., INRA Eds, Paris, 291 p.
- IRPP, 2017. Best Available Techniques (BAT) reference document for the intensive rearing of poultry or pigs.
- 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.
- 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. *J. Clean Prod.*, 165, 1163–1173.
- 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.
- 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.
- Morales A., Buenabad L., Castillo G., Arce N., Araiza B. A., Htoo J. K., Cervantes M., 2015. Low-protein amino acid-supplemented diets for growing pigs: Effect on expression of amino acid transporters, serum concentration, performance, and carcass composition. *J. Anim. Sci.*, 93, 2154–2164.
- 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.
- Rigolot C., Espagnol S., Robin P., Hassouna M., Béline F., Paillat J. M., Dourmad, J. Y., 2010. Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part II: effect of animal housing, manure storage and treatment practices. *Animal*, 4, 1413–1424
- RMT Elevages & Environnement, 2016. Evaluation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs. Influence de l'alimentation, du mode de logement et de la gestion des effluents. 28 p.
- van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J. Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Anim Feed Sci Tech*, 143, 387–405.
- van Zanten H.H.E., Bikker P., Meerburg B.G., de Boer I.J.M., 2017. Attributional versus consequential life cycle assessment and feed optimization: alternative protein sources in pig diets. *Int. J. Life Cycle Ass.*, 23, 1–11.
- Vautier B., Quiniou N., Van Milgen J., Brossard L., 2013. Accounting for variability among individual pigs in deterministic growth models. *Animal*, 7, 1265–1273.
- Wang H., Long W., Chadwick D., Velthof G.L., Oenema O., Ma W., Wang J., Qin W., Hou Y., Zhang F., 2020. Can dietary manipulations improve the productivity of pigs with lower environmental and economic cost? A global meta-analysis. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 289, 106748.