



Comment la gamme de matières premières utilisée pour les aliments modifie-t-elle les performances techniques et l’empreinte environnementale des porcs à l’engraissement ?

Estelle JANODET (1, 2), Hélène GILBERT (1), Ludovic BROSSARD (2), David RENAUDEAU (2), Florence GARCIA-LAUNAY (2)

(1) UMR1388 GenPhySE, INRAE, Université de Toulouse, INPT, 31326, Castanet-Tolosan, France

(2) UMR1348 PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590, Saint-Gilles, France

estelle.janodet@inrae.fr

Comment la gamme de matières premières utilisée pour les aliments modifie-t-elle les performances techniques et l’empreinte environnementale des porcs à l’engraissement ?

Diversifier les ressources alimentaires est un moyen pour atténuer les impacts environnementaux de la production porcine. Cependant, les porcs sélectionnés avec des aliments très digestibles ne sont pas forcément les meilleurs animaux dans des systèmes diversifiés. L’objectif de cette étude était de caractériser la multiperformance des porcs dans deux systèmes d’élevage contrastés en termes de ressources alimentaires : un système conventionnel (SC) représentatif d’un élevage commercial français et un système alternatif (SA) privilégiant des ressources à faible coût d’opportunité. Un jeu de 1392 profils de croissance a été établi à partir de données expérimentales sur des mâles entiers à l’aide du logiciel InraPorc®. Les aliments ont été formulés à moindre coût (FMC) ou avec une formulation multiobjectif (FMO) qui minimise conjointement les impacts environnementaux (changement climatique, utilisation de ressources fossiles, acidification, potentiels d’eutrophisation et usage des terres) et le prix des aliments. Pour chaque combinaison système x formulation (scénario), les performances et les impacts environnementaux en sortie de ferme de chaque profil, considéré comme le profil moyen d’une population, ont été simulés avec un modèle individu-centré de l’atelier d’engraissement. La FMO et l’utilisation de matières premières à faibles impacts environnementaux (coproduits végétaux, déchets alimentaires, concentrés protéiques) présentaient un fort potentiel de réduction des impacts environnementaux sans dégradation des performances techniques, grâce à des substitutions de céréales et de tourteaux, et l’incorporation de co-produits dans les formules. Les porcs se classent différemment dans chaque scénario pour leur impact changement climatique, avec des corrélations entre scénarios de 0,26 à 0,97. La stratégie adoptée a permis d’évaluer la multiperformance des porcs et leur classement dans une diversité de systèmes, et pourra être utilisée pour identifier des interactions génétique x environnement.

How does the range of feed ingredients influence the technical performance and environmental footprint of fattening pigs?

Diversifying feed resources is one way to decrease environmental impacts of pig production, but the pigs currently selected under feeding with highly digestible feeds may not be the best in diversified systems. This study aimed at characterizing the multi-performance of pigs in two farming systems with contrasting feed resources: a conventional system (SC) representative of a French commercial farm and an alternative system (SA) that favoured ingredients with low opportunity costs. A set of 1,392 growth profiles was established from experimental data on entire Large White males using InraPorc® software. Feeds were formulated using either a least-cost approach (LCF) or multi-objective formulation (MOF) that minimised both environmental impacts (i.e. climate change, use of fossil resources, acidification, eutrophication potentials and land use) and feed price. For each system x formulation combination (i.e. scenario), the performance and environmental impacts at the farm gate of each profile, considered as the average profile of a population, were simulated using an individual-based model of a fattening unit. Both MOF and the use of ingredients with low environmental impacts (e.g. plant co-products, food waste, protein concentrates) had a high potential for decreasing impacts through substitutions within cereals and meals cereals and meals and the use of co-products in formulations, without degrading the technical performance. Pigs ranked differently in each scenario according to their climate change impact, with correlations between scenarios of 0.26-0.97. The strategy followed effectively assessed the multi-performance of pigs and their ranking in a variety of systems and could be used to identify interactions between genetics and the environment.

INTRODUCTION

La production porcine fait face à des enjeux économiques, environnementaux et sociétaux pour maintenir sa durabilité. Elle contribue à divers impacts environnementaux par des émissions de gaz à effet de serre, des émissions polluantes consécutives aux rejets d'azote et de phosphore ou encore la consommation de ressources fossiles (McAuliffe *et al.*, 2016). L'alimentation représente la majeure partie des coûts de production et est le principal contributeur à l'empreinte environnementale des élevages de porcs (Basset-Mens et van der Werf, 2005). Par ailleurs, l'augmentation et la variabilité croissante des prix des matières premières (MP) dues aux tensions entre usages pour l'alimentation humaine, animale et l'énergie affectent la rentabilité économique des élevages (Cadéro *et al.*, 2018).

Pour répondre à ces enjeux, différentes méthodes et outils ont été développés pour formuler des aliments en réduisant la compétition entre alimentation animale et alimentation humaine (van Hal *et al.*, 2019) ou encore pour minimiser les impacts des aliments calculés par Analyse de Cycle de Vie (ACV) (Garcia-Launay *et al.*, 2018). Il en résulte des aliments incorporant des ressources actuellement minoritaires dans les formules (résidus de cultures, pois, déchets de l'alimentation humaine...). De plus, ces dernières années, les pressions économiques conduisent à des modifications du profil des ressources alimentaires disponibles en élevage, avec en particulier l'incorporation dans les rations alimentaires de MP plus variées et/ou de moindre qualité nutritionnelle. En parallèle, l'amélioration génétique des porcs a conduit à la sélection d'animaux plus performants (plus maigres et avec une vitesse de croissance plus élevée) avec des rations alimentaires riches en énergie et faciles à digérer.

L'objectif de cette étude était de déterminer si la gamme de MP utilisée et le type de formulation modifie les performances techniques et l'empreinte environnementale de porcs engraisés. L'hypothèse est que des profils de MP différents modifient le classement des individus d'une population sur la base des impacts environnementaux. Pour cela nous avons développé, à partir d'outils existants, une méthodologie pour prédire individuellement les performances techniques, économiques et environnementales de porcs à l'engraissement dans des systèmes de production qui intègrent des profils de ressources alimentaires différents.

1. MATERIEL ET METHODES

Deux systèmes d'élevage contrastés sur le profil de ressources disponibles ont été conçus : un système conventionnel (SC), avec des MP classiques en élevage commercial, et un système alternatif (SA) limitant la compétition avec l'alimentation humaine et la production de biocarburants, qui privilégie des MP à faibles impacts. Dans ces systèmes, deux méthodes de formulation des aliments ont été testées : formulation à moindre coût (FMC) et une formulation multi-objectif (FMO) qui minimise conjointement le prix et les impacts environnementaux de l'aliment (Garcia-Launay *et al.*, 2018).

1.1. Description du modèle PigOptim

Les simulations ont été réalisées à l'aide d'un modèle individu-centré simulant les performances techniques, économiques et environnementales d'un atelier d'engraissement (Cadéro *et al.*, 2018 ; Davoudkhani *et al.*, 2020). Un premier module permet de

formuler des aliments suivant les méthodes FMC et FMO. Ensuite, le module de simulation de croissance des porcs est basé sur le modèle InraPorc® (van Milgen *et al.*, 2008) et simule les performances techniques individuelles des porcs. Un troisième module évalue les performances économiques et environnementales indicatrices de la multiperformance individuelle en sortie de ferme. Avec le prix des MP et une grille de paiement carcasse, PigOptim calcule aussi des indicateurs économiques par porc. Les impacts environnementaux sont évalués par ACV et exprimés par kg de poids vif en sortie de ferme. Le périmètre de l'ACV inclut la production et le transport des aliments, les émissions au bâtiment et au cours du stockage des effluents. Les impacts de la production des porcelets ont été extraits de la base de données AGRIBALYSE (version 3.0). Les impacts ont été calculés avec la méthode EF 3.0 pour : changement climatique (CC, kg-eq CO₂/kg), potentiel d'acidification (AC, mol H⁺-eq/kg), potentiel d'eutrophisation de l'eau douce (EU eau douce, kg P-eq/kg), terrestre (EU terrestre, mol N-eq/kg) et marine (EU marine, kg N-eq/kg), consommation d'énergie fossile (MJ/kg), consommation en eau (m³/kg) et utilisation des terres (Pt/kg).

1.2. Paramètres des systèmes d'élevage

Dans ce projet, un système d'élevage est défini essentiellement par la liste des ressources disponibles pour formuler les aliments, leurs valeurs nutritionnelles, leurs impacts environnementaux et les contraintes d'incorporation associées.

Pour SC, la liste des MP a été établie selon les « Notes de conjoncture » entre 2019 et 2021 de l'IFIP (Institut technique du porc), complétées d'apports de Wilfart *et al.* (2018) et de Quelen *et al.* (2021). Elle comprend les céréales traditionnellement utilisées, certains coproduits de maïs et de blé, des oléagineux, des huiles et des tourteaux. Des coproduits d'origine animale ont également été inclus. En SA, toutes les MP du SC ont été incluses, à l'exception du soja et des produits à base de palme. Des MP innovantes et coproduits ayant des impacts environnementaux réduits ont été intégrés tels que des concentrés protéiques (concentrés de pomme de terre, concentrés de biomasse verte), des déchets issus de l'industrie agroalimentaire (coproduits de biscuiterie), des coproduits végétaux (pomme de terre, betterave sucrière) et des coproduits issus de la production de biocarburants comme alternative aux céréales (Popp *et al.*, 2016 ; Pinotti *et al.*, 2021 ; Møller *et al.*, 2022). Dans les deux systèmes, une supplémentation en acides aminés synthétiques, vitamines et minéraux a été apportée pour couvrir les besoins des porcs. En SC, les contraintes d'incorporation ont été fixées conformément à la littérature (IFIP, 2019-2021 ; Méda *et al.*, 2020). En SA, les taux d'incorporation maximaux pour le maïs et le blé ont été réduits de moitié par rapport au SC, et une contrainte minimale de 50% sur le taux d'incorporation total de MP innovantes a été fixée.

1.3. Paramétrage des profils de porcs

Dans le modèle, les porcs sont décrits individuellement par un jeu de 5 paramètres décrivant leur profil d'ingestion, de croissance et leurs besoins nutritionnels (Brossard *et al.*, 2006). Des données de 1392 porcs Large White (mâles entiers) élevés entre 2017 et 2018 à la station de phénotypage INRAE UE3P (UE 3P. 2018 - <https://doi.org/10.15454/1.5573932732039927E12>) France Génétique Porc (Le Rheu, France) ont été utilisées (Déru *et al.*, 2020). Les profils de croissance ont été ajustés à l'aide du logiciel InraPorc® dans sa version population. Le profil de

croissance de chaque porc a ensuite été utilisé comme profil « parent » pour générer une population de 1000 profils « fils » virtuels à partir de la matrice de variance-covariance des 5 paramètres des profils de croissance, de leurs lois de distribution et des valeurs du parent (Vautier *et al.*, 2013). Les besoins nutritionnels de chaque profil « parent », exprimés en grammes de lysine digestible par mégajoule d'énergie nette, ont été estimés afin de calculer les contraintes minimales en acides aminés digestibles des aliments pour la phase croissance (de 30 kg à 65 kg) et la phase de finition (jusqu'à abattage).

1.4. Simulations

Les impacts environnementaux des MP ont été extraits de la base de données AGRIBALYSE (v.3.0) disponible sur SimaPro® (SimaPro® v.9.3.0.3). Les valeurs nutritionnelles sont issues des tables INRAE-CIRAD-AFZ (2017, <https://www.feedtables.com/>). Les prix des MP sont basés sur les moyennes mensuelles des « Notes de conjoncture » Ifip entre 2019 et 2021. Pour les MP du SA sans prix connu, la moyenne des prix des MP du SA hors acides aminés de synthèse, vitamines et minéraux a été utilisée afin que leur incorporation se fasse d'après leurs valeurs nutritionnelles et/ou environnementales. La grille de paiement Uniporc au 01/01/2021 a été utilisée.

Pour simuler les indicateurs de multiperformance d'un porc parent, nous avons formulé un aliment pour chaque phase sur la base des besoins du profil parent, puis simulé la croissance de ses 1000 profils fils avec ces aliments. Pour chaque porc parent et chaque indicateur, un ensemble de 1000 performances est donc disponible en sortie de modèle. Nous avons ainsi calculé des performances moyennes et leur variabilité intra-profil parent pour chaque système et formulation. Les corrélations de Spearman ont été calculées entre scénarios.

Pour chaque porc parent, 4 scénarios combinaisons des deux systèmes d'élevage et des deux méthodes de formulation des aliments ont donc été simulés : SC FMC, SC FMO, SA FMC, SA FMO. L'alimentation des porcs a été simulée selon une stratégie en deux phases avec une restriction à 2,6 kg/j. Dans tous les scénarios, 1392 bandes de 1000 porcs ont été simulées indépendamment (une bande de porcs était simulée par profil parent). L'âge de début d'engraissement a été fixé à 70 jours pour un poids vif de 31 kg (références GTE, IFIP, 2015). Dans les deux systèmes les effluents ont été traités sous forme de lisier liquide stocké à l'extérieur dans une fosse couverte.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau 1 – Résultats zootechniques et impacts environnementaux¹ par kg de poids vif et par kg d'aliment (moyenne (écart-type) des moyennes par profil parent) selon le système d'élevage et le type de formulation des aliments²

	Système conventionnel		Système alternatif	
	FMC	FMO	FMC	FMO
Performances techniques				
IC (kg / kg)	2,46 (0,13)	2,25 (0,20)	2,36 (0,14)	2,20 (0,19)
GMQ (kg / jour)	0,94 (0,10)	1,03 (0,10)	0,97 (0,11)	1,05 (0,11)
CMJ (kg / jour)	2,29 (0,24)	2,30 (0,23)	2,29 (0,24)	2,30 (0,23)
TMP (%)	57,36 (1,90)	59,64 (2,65)	56,88 (2,00)	58,03 (2,70)
Poids abattage (kg)	121,1 (4,9)	125,0 (3,9)	122,5 (4,8)	125,6 (3,7)
Durée d'engraissement (jours)	97,7 (5,7)	92,8 (6,2)	95,7 (6,5)	91,3 (6,3)
Impacts environnementaux par kg de poids vif				
CC (kg CO ₂ -eq / kg)	1,83 (0,1)	1,60 (0,13)	1,43 (0,06)	1,11 (0,07)
AC (mol H ⁺ -eq / kg)	0,04 (4,15.10 ⁻³)	0,04 (6,00.10 ⁻³)	0,07 (0,03)	0,03 (0,01)
EU eau douce (g P-eq / kg)	0,39 (0,04)	0,32 (0,04)	0,76 (0,40)	0,16 (0,15)
EU terrestre (mol N-eq / kg)	0,20 (0,02)	0,17 (0,03)	0,17 (0,01)	0,14 (0,02)
EU marine (g N-eq / kg)	12,50 (0,76)	11,86 (1,02)	8,64 (0,89)	4,39 (0,75)
CE (MJ / kg)	15,57 (0,61)	12,44 (0,90)	11,03 (0,39)	8,85 (0,49)
UT (Point / kg)	165,37 (10,66)	151,48 (11,86)	94,32 (3,72)	48,96 (6,71)
Impacts environnementaux par kg d'aliment				
CC (kg CO ₂ -eq / kg aliment)	0,43 (0,03)	0,36 (0,04)	0,20 (3,97.10 ⁻³)	0,11 (0,01)
AC (mol H ⁺ -eq.10 ⁻³ / kg aliment)	7,69 (0,12)	6,42 (0,21)	0,02 (0,01)	2,04 (0,06)
EU eau douce (g P-eq / kg aliment)	0,16 (0,01)	0,13 (0,01)	0,38 (0,24)	0,04 (0,09)
EU terrestre (mol N-eq.10 ⁻³ / kg aliment)	33,08 (0,36)	27,83 (0,78)	12,60 (0,26)	4,86 (1,39)
EU marine (g N -eq / kg aliment)	5,03 (0,18)	5,15 (0,17)	3,02 (0,51)	0,71 (0,36)
CE (MJ / kg aliment)	5,25 (0,20)	3,94 (0,32)	2,90 (0,11)	1,86 (0,18)
UT (Point / kg aliment)	71,96 (3,78)	70,15 (2,94)	34,49 (0,20)	9,81 (3,83)
Consommation en eau (m ³ / kg aliment)	1,85 (0,05)	0,44 (0,10)	0,30 (0,03)	0,05 (0,03)

¹ IC, indice de consommation ; GMQ, gain moyen quotidien ; CMJ, consommation moyenne journalière ; TMP, taux de muscles des pièces ; CC, changement climatique ; AC, acidification ; EU, eutrophisation ; CE, consommation d'énergies fossiles ; UT, utilisation des terres

² FMC = Formulation des aliments à moindre coût, FMO = Formulation multiobjectif des aliments.

2.1. Performances moyennes dans chaque scénario

Les performances techniques et environnementales des porcs et les impacts environnementaux des aliments pour les quatre scénarios sont présentés dans le Tableau 1. Pour chaque méthode de formulation, les performances techniques varient peu en moyenne d'un système à l'autre et sont conformes aux performances attendues pour ces profils de porcs, ce qui s'explique par une couverture similaire des besoins

nutritionnels des animaux. La comparaison de ces performances simulées avec les résultats techniques de la GTE Bretagne (IFIP, 2015) montre que les ordres de grandeurs sont cohérents. Les indicateurs simulés sont comparables aux données GTE (atelier naisseur-engraisseur) : indice de consommation à 2,68 (entre 30 et 115 kg de poids vif), TMP à 61,0 %, GMQ de 834 g/j, âge à 115 kg de 180 jours et poids moyen d'abattage de 116,0 kg.

Les impacts environnementaux CC, EU marine, CE et UT (par kg de poids vif) pour le scénario SA FMC sont plus faibles en

moyenne que ceux du scénario SC FMC. Tous les impacts environnementaux du scénario SA FMO sont réduits par rapport au scénario SC FMO. Les ordres de grandeurs des impacts environnementaux (par kg de poids vif) sont comparables à la littérature (Gislason *et al.*, 2023) et aux valeurs d'impacts environnementaux évalués selon la méthode EF 3.0 à partir de l'inventaire de cycle de vie (ICV) de la base de données AGRIBALYSE 3 pour la production d'un porc à l'engraissement de 120 kg (système conventionnel, moyenne nationale française, calculs réalisés à l'aide du logiciel SimaPro® v.9.3.0.3).

En comparaison avec les aliments du scénario SC FMC, les impacts des aliments du scénario SC FMO sont tous plus faibles, sauf pour l'impact EU marine. De façon similaire, les impacts des aliments du scénario SA FMO sont réduits par rapport à ceux des aliments du scénario SA FMC, excepté pour l'impact AC. Comme attendu (Garcia-Launay *et al.*, 2018), la formulation multi-objectif a permis de réduire les impacts environnementaux des aliments par rapport à la formulation à moindre coût (Tableau 1). Les valeurs d'impacts des aliments pour le SC sont similaires à ceux des aliments croissance et finition dont les ICV sont disponibles sur SimaPro®.

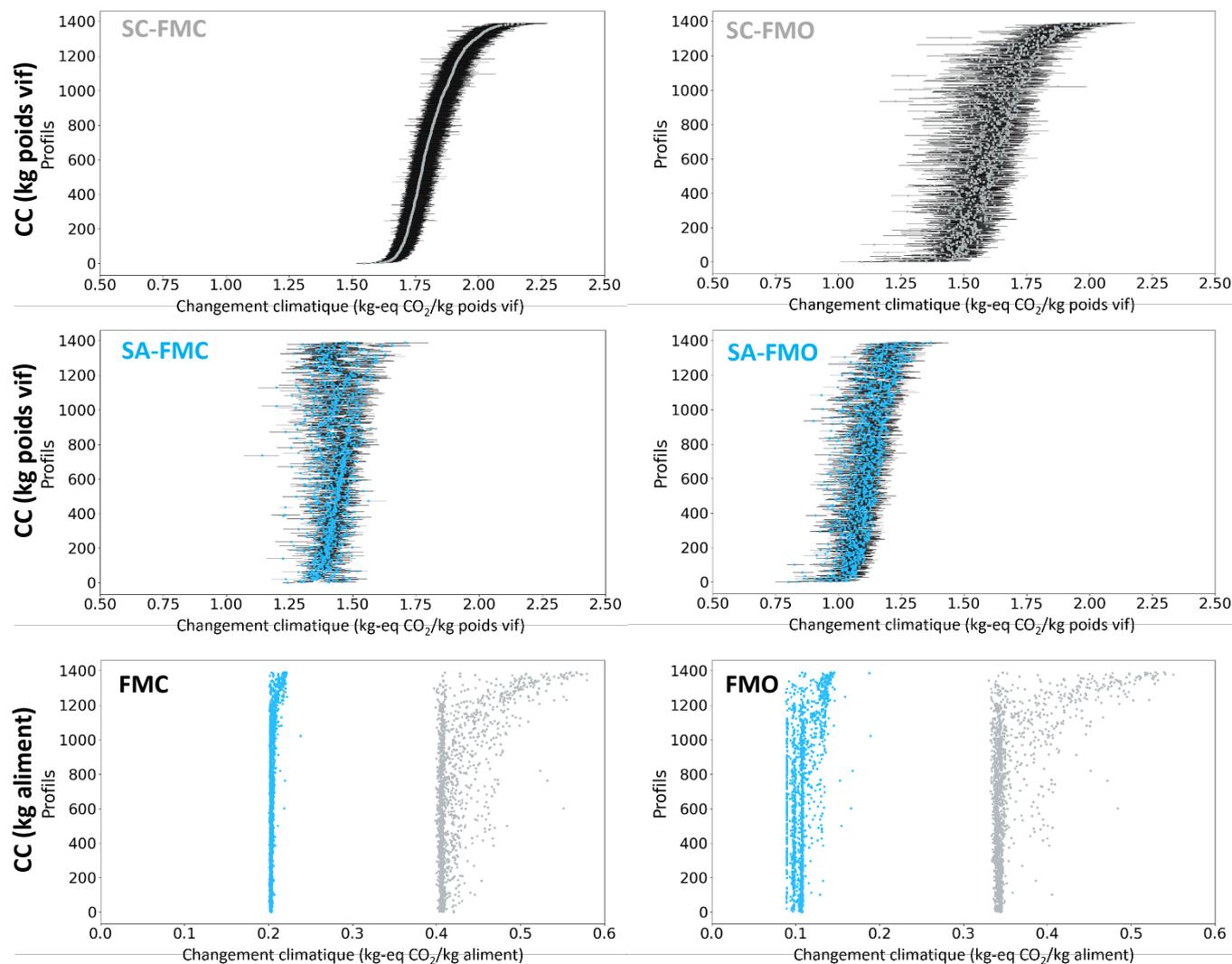


Figure 1 – Valeurs d'impact Changement Climatique (CC) par kg de poids vif (médiane et écart-interquartile pour chaque profil parent, d'après les performances des profils fils) et par kg d'aliment (aliment moyen pour les phases de croissance et finition pour chaque profil individuel) pour chaque profil dans le système conventionnel (en gris) et le système alternatif (en bleu), selon la méthode de formulation des aliments (FMC, formulation à moindre coût, à gauche; FMO, formulation multiobjectif, à droite).

Pour tous les graphiques, les profils de porcs sont triés selon les valeurs médianes d'impact Changement Climatique des profils parents dans le système conventionnel en formulation à moindre coût (graphique en haut à gauche)

2.2. Performances techniques et environnementales entre systèmes et méthodes de formulation

Afin de comprendre les effets du scénario sur le classement des porcs, 3 indicateurs ont été retenus : l'impact CC du kg de porc en sortie de ferme, l'impact CC du kg d'aliment consommé, et l'IC. Dans la Figure 1, les profils de porcs sont ordonnés selon l'impact CC du kg de porc des profils dans le scénario SC FMC pour tous les graphiques. Entre le SC et le SA, les corrélations des rangs de Spearman de l'impact CC du kg de porc sont de 0,26 et 0,97 en FMC et en FMO, respectivement. Intra-système,

les corrélations entre FMC et FMO sont de 0,78 (SC) et 0,32 (SA). Sur cet indicateur, les porcs se classent donc différemment entre scénarios. En SC FMC et SC FMO, deux groupes d'aliments ayant des impacts différents peuvent être identifiés (Figure 1) : un premier groupe d'aliments dont les impacts varient peu (autour de 0,41 kg-eq CO₂/kg en FMC et 0,34 kg-eq CO₂/kg en FMO), et un deuxième groupe d'aliments dont les impacts s'écartent de ces deux moyennes et sont plus hétérogènes (17% des aliments > 0,45 kg-eq CO₂/kg pour FMC et 17% des aliments > 0,38 kg-eq CO₂/kg pour FMO). En SC, les impacts sont resserrés autour de 0,2 kg-eq CO₂/kg en FMC et autour de 0,1

kg-eq CO₂/kg en FMO, la variabilité étant plus importante dans ce dernier scénario (Δmin-max de 0,10 kg-eq CO₂/kg en FMO contre 0,04 kg-eq CO₂/kg en FMC). En comparaison avec la FMC, la FMO a en moyenne réduit l'impact CC des aliments de 16% en SC et de 45% en SA. Les impacts des aliments en SC sont en moyenne 53% (FMC) et 69% (FMO) plus faibles qu'en SA.

En SC, les porcs ayant un impact CC par kg faible ont en général

un IC faible (Figure 1). En revanche, les porcs ayant un impact CC par kg élevé ont soit un IC élevé et un impact CC du kg d'aliment modéré soit un IC intermédiaire et un impact CC du kg d'aliment élevé. En revanche, le classement des profils sur l'impact CC par kg de porc en SA s'explique par leur IC. En effet, les corrélations entre IC et impact CC du kg de porc sont plus élevées en SA (> 0.91) qu'en SC (< 0.87).

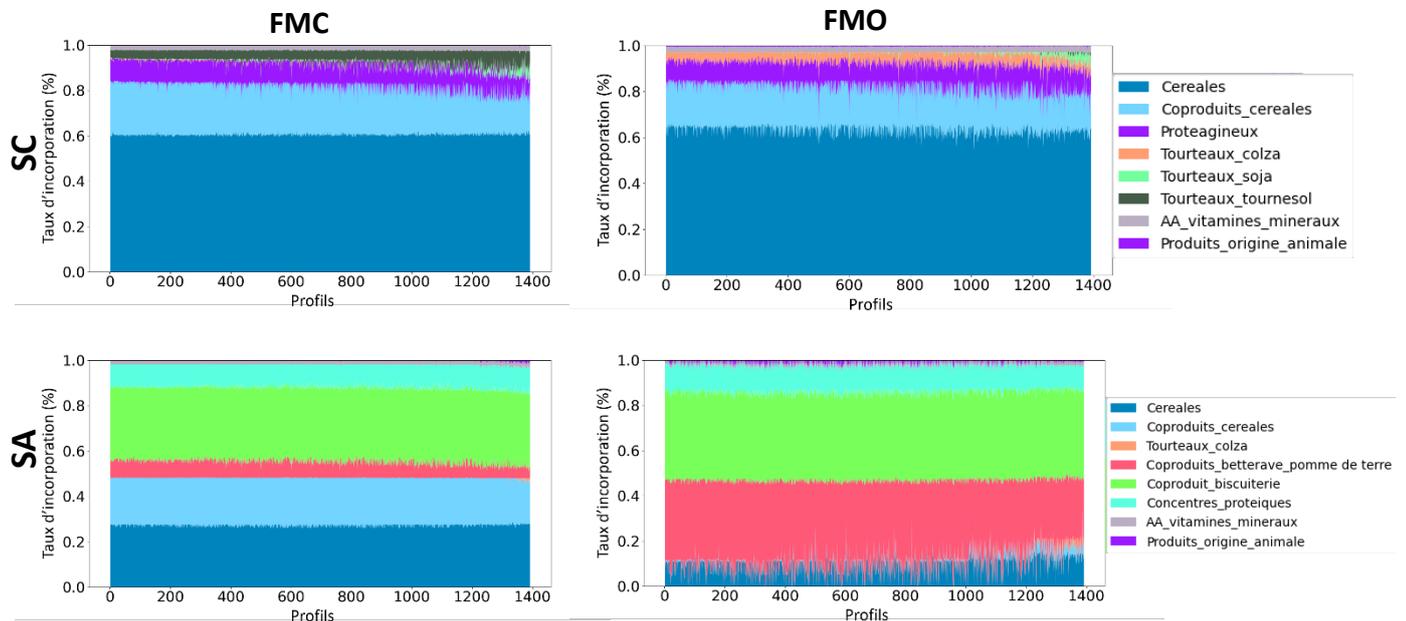


Figure 2 – Composition des formules des aliments dans le système conventionnel (en haut) et le système alternatif (en bas) et selon la méthode de formulation (formulation à moindre coût à gauche ; formulation multiobjectif à droite)

Comme sur la Figure 1, pour tous les graphiques, les profils de porcs sont triés du meilleur individu (à gauche de l'axe des abscisses) au moins bon (à droite de l'axe des abscisses) sur l'impact Changement Climatique par kg de poids vif évalué dans le système conventionnel en formulation à moindre coût

2.3. Composition des aliments

Les compositions des formules dans les différents scénarios sont présentées dans la Figure 2. Les aliments du SC FMC contiennent en moyenne 63% de céréales, 21% de coproduits de céréales, moins de 1% de tourteaux, 7% de coproduits de betterave et pomme de terre, 33% de coproduits de biscuiterie, et 10% de concentrés protéiques. Les aliments du SA FMO sont composés en moyenne de 9% de céréales, 1% de coproduits de céréales, moins de 1% de tourteaux, 36% de coproduits de betterave et pomme de terre, 39% de coproduits de biscuiterie, et 11% de concentrés protéiques. Ce sont les variations des taux d'incorporation des céréales et coproduits de céréales, ainsi que des MP innovantes qui différencient le plus les formules FMC et FMO du SA. Les contraintes d'incorporation du SA ont donc bien permis de recruter des ressources à moindres impacts dès les scénarios FMC, permettant de réduire fortement l'impact CC même avec une formulation à moindre coût, sans impact majeur sur les performances techniques.

Les formules FMC sont globalement plus homogènes entre profils que les formules FMO pour le même système, comme attendu au vu des impacts CC des aliments. Dans le SC, les formules FMC avec des impacts CC supérieurs à 0,45 kg-eq CO₂/kg (Figure 1) incorporent moins de drèches de blé (7,8%, vs 10% pour ceux qui ont des impacts inférieurs à 0,45) et plus de tourteau de soja (2,8% vs 0,06%). Les formules FMO avec des impacts CC supérieurs à 0,38 kg-eq CO₂/kg (Figure 1) intègrent moins de drèches de blé (6,5% vs 9,5%), et le blé est substitué par du maïs et du triticale, ces céréales ayant des impacts similaires et plus élevés que le blé (Wilfart *et al.*, 2016). Ces formules contiennent aussi plus de tourteau de soja (2% vs 0,002%). Elles présentent des taux de MAT élevées (>120 en FMC et > 123 en FMO).

Les aliments du SA FMC sont composés en moyenne de 27% de céréales, 21% de coproduits de céréales, moins de 1% de tourteaux, 7% de coproduits de betterave et pomme de terre, 33% de coproduits de biscuiterie, et 10% de concentrés protéiques. Les aliments du SA FMO sont composés en moyenne de 9% de céréales, 1% de coproduits de céréales, moins de 1% de tourteaux, 36% de coproduits de betterave et pomme de terre, 39% de coproduits de biscuiterie, et 11% de concentrés protéiques. Ce sont les variations des taux d'incorporation des céréales et coproduits de céréales, ainsi que des MP innovantes qui différencient le plus les formules FMC et FMO du SA. Les contraintes d'incorporation du SA ont donc bien permis de recruter des ressources à moindres impacts dès les scénarios FMC, permettant de réduire fortement l'impact CC même avec une formulation à moindre coût, sans impact majeur sur les performances techniques.

Les formules FMC sont globalement plus homogènes entre profils que les formules FMO pour le même système, comme attendu au vu des impacts CC des aliments. Dans le SC, les formules FMC avec des impacts CC supérieurs à 0,45 kg-eq CO₂/kg (Figure 1) incorporent moins de drèches de blé (7,8%, vs 10% pour ceux qui ont des impacts inférieurs à 0,45) et plus de tourteau de soja (2,8% vs 0,06%). Les formules FMO avec des impacts CC supérieurs à 0,38 kg-eq CO₂/kg (Figure 1) intègrent moins de drèches de blé (6,5% vs 9,5%), et le blé est substitué par du maïs et du triticale, ces céréales ayant des impacts similaires et plus élevés que le blé (Wilfart *et al.*, 2016). Ces formules contiennent aussi plus de tourteau de soja (2% vs 0,002%). Elles présentent des taux de MAT élevées (>120 en FMC et > 123 en FMO).

L'intégration de ressources alternatives (coproduits végétaux, concentrés protéiques, déchet alimentaire), la suppression du soja et la réduction de la part de céréales dans les formules du SA ont réduit les impacts environnementaux des porcs sans dégrader les performances techniques indiquant que les formules obtenues couvrent les besoins des animaux. L'atténuation des impacts est d'autant plus efficace avec une formulation multiobjectif des aliments.

Dans le SA, nous avons choisi un taux d'incorporation minimum pour la somme des MP alternatives de 50%, afin de contraster avec le SC. Les formules FMO intègrent ces MP jusqu'à 80%. En raison de différences de composition nutritionnelle et de digestibilité (matière organique, lysine) par rapport à des MP plus classiques, cette valeur ne semble pas réaliste en pratique. Les compositions nutritionnelles disponibles dans la littérature sont aussi très variables (Bikker *et al.*, 2023). En pratique, il sera essentiel de mieux caractériser la valeur de ces ressources avant formulation afin d'ajuster la composition des aliments, en termes nutritionnels, mais aussi garantir la sécurité sanitaire et de disponibilité.

Cependant, les systèmes d'élevage conçus dans cette étude sont suffisamment contrastés pour observer du reclassement entre les porcs sur l'impact changement climatique. Les analyses sont à poursuivre sur les autres impacts environnementaux évalués, et des systèmes d'élevage

différents, pour évaluer l'ampleur des reclassements et leur impact potentiel sur des choix de stratégies de sélection et de conduite d'élevage vertueuses.

CONCLUSION

Cette étude a montré que la démarche de modélisation adoptée permet de caractériser la multiperformance de porcs à l'engraissement et d'établir leurs classements dans différents environnements de production. C'est l'association entre l'incorporation de MP à faibles impacts environnementaux et la formulation multiobjectif des aliments qui présente le plus grand potentiel de réduction des impacts des porcs. Les meilleurs profils en termes de CC dans un système conventionnel standard ne sont pas nécessairement les meilleurs dans un système alternatif intégrant majoritairement des coproduits dans les formules. Deux autres systèmes d'élevage ont été conçus, un système privilégiant des ressources produites localement et un système biologique intégrant des fourrages. Pour les simulations dans ces systèmes, il est possible que le modèle INRAPorc® actuel ne réponde pas complètement au besoin, car par exemple il ne tient pas compte de l'encombrement important de certaines MP telles que les fourrages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Basset-Mens C., van der Werf H. M. G., 2005. Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agric. Ecosyst. Env.*, 105, 127–144.
- Bikker P., Jansman A. J. M., 2023. Review: Composition and utilization of feed by monogastric animals in the context of circular food production systems. *Animal*, 17, 100892.
- Brossard L., van Milgen J., Lannuzel P. Y., Bertinotti R., Rivest J., 2006. Analyse des relations entre croissance et ingestion à partir de cinétiques individuelles : implications dans la définition de profils animaux pour la modélisation. *J. Rech. Porcine*, 38, 217-224.
- Cadéro A., Aubry A., Brossard L., Dourmad J. Y., Salaün Y., Garcia-Launay F., 2017. Modelling interactions between farmer practices and fattening pig performances with an individual-based model. *Comput. Electron. Agric.*, 12, 1277–1286.
- Davoudkhani M., Mahé F., Dourmad J. Y., Gohin A., Darrigrand E., Garcia-Launay F., 2020. Economic optimization of feeding and shipping strategies in pig-fattening using an individual-based model. *Agric. Syst.*, 184, 102899
- 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. *Front. Vet. Sci.*, 8, 689012.
- Déru V., Bouquet A., Labussière E., Ganier P., Blanchet B., Carillier-Jacquin C., Gilbert H., 2020. L'efficacité digestive est-elle un caractère intéressant pour améliorer l'efficacité alimentaire chez le porc ? *J. Rech. Porcine*, 52, 13-18.
- 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. *Br. J. Nutr.*, 120, 1298-1309.
- Gislason S., Birkved M., Maresca A., 2023. A systematic literature review of Life Cycle Assessments on primary pig production: Impacts, comparisons, and mitigation areas. *Sustain. Prod. Consum.*, 42, 44-62.
- van Hal O., de Boer I. J. M., Muller A., de Vries S., Erb K. H., Schader C., Gerrits W. J. J., van Zanten H. H. E., 2019. Upcycling food leftovers and grass resources through livestock: Impact of livestock system and productivity. *J. Clean. Prod.*, 219, 485-496.
- Mackenzie S.G., Leinonen I., Ferguson N., Kyriazakis I., 2016. Towards a methodology to formulate sustainable diets for livestock: accounting for environmental impact in diet formulation. *Br. J. Nutr.*, 115, 1860-1874.
- McAuliffe G.A., Chapman D.V., Sage C.L., 2016. A thematic review of life cycle assessment (LCA) applied to pig production. *Environ. Impact Assess. Rev.*, 56, 12–22.
- 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.
- van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J. Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 387-405.
- Møller H., Samsonstuen S., Øverland M., Modahl I. S., Olsen H. F., 2022. Local non-food yeast protein in pig production-environmental impacts and land use efficiency. *Livest. Sci.*, 260, 104925.
- Pinotti L., Luciano A., Ottoboni M., Manoni M., Ferrari L., Marchis D., Tretola M., 2021. Recycling food leftovers in feed as opportunity to increase the sustainability of livestock production. *J. Clean. Prod.*, 294, 126290.
- Popp J., Harangi-Rákos M., Gabnai Z., Balogh P., Antal G., Bai A., 2016. Biofuels and their co-products as livestock feed: global economic and environmental implications. *Molecules*, 21, 285–311.
- Vautier B., Quiniou N., van Milgen J., Brossard L., 2013. Accounting for variability among individual pigs in deterministic growth models. *Animal*, 7, 1265-1273.
- 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.
- Wilfart A., Dusart L., Méda B., Gac A., Espagnol S., Morin L., Dronne Y., Garcia-Launay F., 2018. Réduire les impacts environnementaux des aliments pour les animaux d'élevage. *INRA Prod. Anim.*, 31, 289-306.