

Combiner génétique et nutrition pour une optimisation économique et environnementale en production porcine

Une modélisation à partir de données individuelles pour améliorer la durabilité de la production

Tara SOLEIMANI et Hélène GILBERT

GenPhySE, Université de Toulouse, INRAE, ENVT, 31320 Castanet-Tolosan, France

tara.soleimani@inrae.fr

Combiner génétique et nutrition pour une optimisation économique et environnementale en production porcine

Les impacts environnementaux (IE) et les résultats économiques des systèmes de production peuvent être évalués par des analyses de cycle de vie couplées à des modèles bioéconomiques. De tels modèles ont été développés à partir des performances individuelles de porcs, pour quantifier les IE (potentiel de changement climatique - CC, d'acidification des sols - AP, d'eutrophisation des eaux - EP, occupation des sols - OS), et le résultat économique de scénarios combinant des génétiques différentes pour l'efficacité alimentaire - levier majeur de réduction des coûts et de la production d'effluents, et des formulations multi-objectifs des aliments. Après définition des besoins nutritionnels spécifiques de chaque génétique, des aliments dédiés ont été formulés à moindre coût (MC), à moindre impact environnemental (ME, poids équilibrés pour les 4 catégories), ou combinant ces deux critères (MEC). Les données génétiques (2x57 porcs de lignées divergentes pour l'efficacité alimentaire, performances individuelles obtenues avec un aliment conventionnel) ont permis d'estimer les besoins nutritionnels par lignée, puis de simuler des performances individuelles en réponse aux aliments optimisés. Avec le régime conventionnel initial, la lignée plus efficace avait -7 % d'IE et un meilleur profit ($P < 0,001$). Avec les aliments ME et MEC, l'avantage environnemental des animaux efficaces était réduit (4,91 % et 4,29 %), et l'aliment MEC permettait d'atteindre des profits similaires pour les deux lignées. Cette approche permet donc dans une certaine mesure de compenser, par l'ajustement sous contraintes des rations alimentaires, les désavantages génétiques des animaux les moins efficaces sur les plans économiques et environnementaux. Il est alors envisageable d'orienter des choix stratégiques de sélection et de conduite pour proposer une production porcine durable.

Combining genetics and nutrition in economic and environmental optimization of pig production systems

Life cycle assessment, combined with bioeconomic models, can be used to assess environmental impacts (EI) and profits of production systems. Such models were developed on an individual performance trait basis to quantify the main EI (global warming potential - GWP, terrestrial acidification potential - AP, freshwater eutrophication potential - EP, and land occupation - LO) and the profit for scenarios that combined different genetic levels for feed efficiency, as a principal mechanism to reduce costs and excretion, and multiobjective formulation diets. First, nutritional requirements were obtained for each genetic line separately. Then, diets were optimised for the nutritional objectives and a least-cost (LC), least-EI (LE) or combined LC and LE (joint) objective. Performance records for 57 pigs per line fed a unique conventional diet were used to calibrate the individual pig nutritional profiles and estimate line nutritional requirements. Next, individual performances in response to the optimized diets were simulated. With the experimental conventional diet, the more efficient line had 7% lower EI and better profit ($P < 0.001$) than the less efficient line. With the LE and joint diets, the EI advantage of the more efficient animals was reduced (by 4.91% and 4.29%, respectively), and the two lines had similar profit ($P > 0.05$) with their joint diets. The approach that was developed mitigated, due to the constraints applied to the diet formulation, the innate genetic disadvantages of the less efficient pigs at the economic and environmental levels. These approaches can be used to orientate strategic choices at the selection and management levels for more sustainable pig production.

INTRODUCTION

L'amélioration de l'efficacité alimentaire du porc en croissance peut être obtenue par la combinaison de leviers génétiques (sélection pour une meilleure efficacité), nutritionnels (adéquation de la ration aux besoins de l'animal) et de conduite des porcs (conditions optimales d'utilisation de l'énergie et des nutriments pour la croissance). Cette étude visait à évaluer comment, en actionnant les deux premiers leviers, les piliers économiques et environnementaux de la durabilité des systèmes de production porcins pouvaient être améliorés. Pour ce faire, un modèle d'analyse de cycle de vie (ACV), reconnu pour l'évaluation environnementale des systèmes de production porcins (Monteiro *et al.*, 2020 ; Espagnol *et al.*, 2020), a été développé et associé à un modèle bioéconomique. Pour permettre la prise en compte de différents profils génétiques soumis à des stratégies nutritionnelles adaptées, des outils d'évaluation dédiés, intégrant la prise en compte de la variabilité individuelle des besoins et des performances des porcs, ont été développés. Ces modèles ont été appliqués à des profils de porcs de lignées expérimentales divergentes pour l'efficacité alimentaire, soumis à des régimes alimentaires optimisés, selon le cas, sur les plans nutritionnel et économique, nutritionnel et environnemental, ou nutritionnel, économique et environnemental.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Données expérimentales

Les moyennes des données expérimentales des truies reproductrices et de leurs porcelets Large White de chacune de deux lignées divergentes pour l'efficacité alimentaire ont été collectées à l'unité expérimentale INRAE GenESI (Surgères, France) (GenESI, INRAE, 2018. Unité expérimentale Elevages porcins innovants, doi : 10.15454/1.5572415481185847E12) comme décrit par Gilbert *et al.* (2012). Les enregistrements individuels, de 10 semaines d'âge à l'abattage (110 kg de poids vif), ont été collectés sur les porcs de ces lignées après 5 générations de sélection. Des porcs mâles de chaque lignée (n=57 par lignée) ont eu un accès libre à un aliment conventionnel (aliment de référence) couvrant leurs besoins nutritionnels de 10 semaines d'âge à l'abattage. Pendant cette période, les consommations individuelles journalières ont été enregistrées grâce à des automates d'alimentation (ACEMO, Pontivy, France), tandis que par ailleurs les poids individuels en début et fin de croissance et des mesures d'épaisseur de lard dorsal aux ultrasons (ALOKA SSD-500, Cergy Pontoise, France) en fin de croissance étaient disponibles. La consommation moyenne journalière (CMJ), le gain moyen quotidien (GMQ) et l'épaisseur de lard dorsal moyenne (ELD) ont été calculés, ainsi que deux critères d'efficacité alimentaire, l'indice de consommation (IC) et la consommation moyenne journalière résiduelle (CMJR) (Gilbert *et al.*, 2017).

1.2. Profils individuels de croissance et simulations

Les données individuelles pendant la croissance ont été importées dans le logiciel InraPorc® (Brossard *et al.*, 2014) pour déterminer le profil individuel des besoins nutritionnels de chaque porc sur la période. Les profils ont été calibrés d'après l'ingéré volontaire d'énergie nette (EN) à partir d'une fonction Gamma. Ces profils ont ensuite permis de simuler les performances individuelles des porcs soumis à différents

régimes optimisés, jusqu'à un poids d'abattage de 120 kg. Ces performances individuelles simulées ont finalement servi de paramètres d'entrée pour les modèles bioéconomiques et d'analyse de cycle de vie décrits dans les sections suivantes.

1.3. Modèle bioéconomique

Le modèle retenu suit une modélisation linéaire classique du résultat économique, qui est obtenu comme la différence entre le revenu et les coûts de production pour un porc au poids d'abattage. Le cycle de vie d'un porc a été décomposé en trois phases : de la naissance au sevrage (28 jours d'âge), du sevrage au début d'engraissement (10 semaines d'âge), enfin la période d'engraissement jusqu'au poids d'abattage. Le coût de production d'un porcelet sevré intégrait tous les coûts précédant le sevrage, dont la mise à la reproduction et le renouvellement du troupeau de truies, la santé, l'énergie, l'aliment, l'entretien des bâtiments, le travail, la gestion des effluents et l'amortissement des immobilisations. Les coûts de production pendant la période de post-sevrage ont été estimés d'après des simulations de profils moyens de croissance et d'ingestion des lignées expérimentales à partir de poids individuels et des niveaux d'ingestion par loge et par lignée. Les coûts pendant la période d'engraissement ont été calculés à l'échelle individuelle d'après les performances simulées (section 1.2), et agrégés en quatre catégories : aliment et eau, bâtiment et capital, énergie, travail. Les autres coûts (assurances, frais vétérinaires et de santé, entretien des bâtiments) ont été considérés comme fixes pour chaque porc (Calderón Díaz *et al.*, 2019). Les prix des ingrédients des aliments pour les différentes phases (IFIP, 2020), les coûts énergétiques par porc et la consommation d'eau relativement à l'ingéré ont été extraits des rapports et bases de données de l'IFIP (2014).

Le produit associé à chaque porc était considéré comme uniquement lié à la vente de la carcasse et calculé selon la grille en cours en France (<https://nm.franceagrimer.fr/prix?PORC>), c'est-à-dire un prix de base pour 100 kg de carcasse à 56 % de taux de maigre des pièces (TMP) (129,30 €/carcasse, juillet 2020), corrigé selon un barème spécifique pour le poids et le TMP réels de la carcasse.

1.4. Modèle d'analyse de cycle de vie

Les impacts environnementaux retenus pour cette étude sont les impacts majeurs de la production porcine identifiés dans la littérature : le potentiel de changement climatique (CC, kg CO₂-eq), le potentiel d'acidification des sols (AP, kg SO₂ eq), le potentiel d'eutrophisation des eaux (EP, kg P eq) et l'occupation des sols (OS, m²an). Le modèle d'ACV a été construit autour des performances des porcs soit, avant 10 semaines, les performances moyennes des lignées, et pour la période d'engraissement, les performances individuelles. Le modèle se compose de six modules : profils de performance, plan d'alimentation, émissions, excrétion, consommation d'eau, et consommation d'énergie (Soleimani et Gilbert, 2020a). Les jeux de données ReCiPe Midpoint 2016 (H) V1.02 et ECOALIM (Wilfart *et al.*, 2016) des bases AGRIBALYSE® and Ecoinvent du logiciel SimaPro V8.5.4.0 disponible sur la plateforme MEANS (<https://www6.inrae.fr/means>) ont été utilisés pour, d'abord, déterminer les impacts environnementaux des aliments (de référence et optimisés), puis estimer les impacts de la production d'un kg de porc vivant à l'abattage (unité fonctionnelle du modèle).

1.5. Formulation d'aliments multi objectifs

Les huit ingrédients de l'aliment expérimental de référence (blé, orge, tourteau de soja, huile de tournesol, et acides aminés (AA) de synthèse (L_lysine, L_thrénine, L_tryptophane, DL_méthionine), auxquels se sont ajoutés le maïs, l'avoine, le pois, le triticale et des tourteaux de colza et de tournesol, ont été retenus pour formuler de nouveaux aliments. Les compositions en protéine digestible (CP), AA et EN de ces ingrédients ont été extraites de la base de données INRA-AFZ (Sauvant *et al.*, 2004).

Les formulations optimisées d'aliments ont été effectuées pour couvrir les besoins nutritionnels de chaque lignée séparément, avec les objectifs suivants : (i) le moindre coût (MC, utilisée comme référence pour les autres formulations), (ii) le moindre impact environnemental (ME) dans une limite de + 10 % du coût par rapport à l'aliment MC, (iii) la minimisation conjointe du coût et de l'impact environnemental (MEC). Six aliments (trois par lignée) plus l'aliment expérimental de référence ont donc été évalués.

1.5.1. Détermination des besoins nutritionnels des lignées

Le maximum pendant la croissance des besoins nutritionnels individuels, exprimés en g par MJ EN, obtenus pour les profils InraPorc®, ont été considérés pour cinq indicateurs : protéine digestible (α), lysine digestible (β), thrénine digestible (γ), méthionine digestible (λ) et tryptophane digestible (δ) (Soleimani et Gilbert, 2020b). Pour chaque lignée, la moyenne de ces besoins individuels a été calculée, et retenue comme objectif de formulation d'un aliment unique pour chaque lignée.

1.5.2. Calcul des coûts des aliments

Le coût d'un aliment par unité d'EN a été calculé comme la somme des prix de chaque ingrédient multiplié par la quantité incorporée. L'aliment MC a été formulé pour chaque lignée en minimisant cette fonction tout en respectant les besoins nutritionnels des lignées.

1.5.3. Calcul du score environnemental

Pour chaque aliment, l'impact environnemental de chaque catégorie (CC, AP, EP, OS) a été calculé comme la somme des impacts environnementaux de cette catégorie pour chaque ingrédient, pondérés de la quantité incorporée. Comme proposé par Garcia-Launay *et al.* (2018), chacune de ces composantes a d'abord été normalisée relativement à l'impact environnemental de l'aliment MC de la lignée correspondante, avant de sommer l'ensemble dans un score environnemental global. Un poids identique a été affecté aux quatre impacts retenus. Les aliments ME ont été obtenus en minimisant ce score environnemental tout en couvrant les besoins nutritionnels de chaque lignée.

1.5.4. Optimisations

L'objectif à minimiser pour les aliments MEC a été établi comme la somme du coût de l'aliment, exprimé relativement au coût de l'aliment MC, pondéré d'un facteur $1-w_t$, et de son score environnemental décrit à la section précédente, pondéré d'un facteur w_t . Les formules pour des aliments satisfaisant chacun des trois objectifs ont été obtenues pour chaque lignée avec le package R *mco*, grâce à l'algorithme NSGA-II (paramètres de taille de population de 340 et 3500 générations).

1.6. Statistiques

Pour l'ensemble des paramètres étudiés, les différences entre lignées pour chaque type d'aliment ont été appréciées par des tests de Student et déclarées significatives pour $P < 0,05$.

Les estimations individuelles pour les performances simulées, les impacts environnementaux et les résultats économiques ont finalement permis d'estimer les corrélations entre ces trois résultats.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1.1. Coûts et impacts des aliments optimisés

Les besoins nutritionnels (en g/MJ EN) de la lignée CMJR- étaient systématiquement plus élevés ($P < 0,05$ pour un test de Student des différences entre lignées) que ceux de la lignée CMJR+ : $11,75 \pm 2,46$ (moyenne \pm écart-type) vs $11,04 \pm 2,33$ pour α , $0,91 \pm 0,20$ vs $0,86 \pm 0,18$ pour β , $0,58 \pm 0,12$ vs $0,55 \pm 0,11$ pour γ , $0,27 \pm 0,03$ vs $0,26 \pm 0,05$ pour λ , et $0,16 \pm 0,06$ vs $0,15 \pm 0,03$ pour δ . Les impacts environnementaux et les prix des aliments MC, ME et MEC optimisés pour couvrir les besoins nutritionnels des lignées, ainsi que ceux de l'aliment expérimental de référence, sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Impacts environnementaux¹, score environnemental et prix par unité d'énergie nette (EN) des aliments expérimentaux de référence (Ref.), formulés à moindre coût (MC), à moindre impact environnemental (ME) ou en minimisant les deux conjointement (MEC), pour les lignées à faible (CMJR-) ou forte (CMJR+) consommation moyenne journalière résiduelle

	CC g CO ₂ eq	AP g SO ₂ eq	EP g P eq	OS m ² an eq	Score env.	Coûts 10 ⁻² €	EN MJ
Ref.	509	0,69	0,042	0,19	0,420	2,41	9,7
CMJR-							
MC	541	0,61	0,053	0,18	0,430	2,01	9,3
ME	486	0,71	0,046	0,13	0,392	2,12	9,4
MEC	486	0,66	0,051	0,15	0,394	2,10	9,7
CMJR+							
MC	483	0,68	0,060	0,14	0,399	2,03	10,0
ME	442	0,65	0,059	0,15	0,393	2,13	9,8
MEC	490	0,64	0,050	0,16	0,395	2,06	9,7

¹CC = potentiel de changement climatique ; AP = potentiel d'acidification ; EP = potentiel d'eutrophisation ; OS = occupation des sols ; Score env. = score environnemental

Tous les aliments optimisés avaient un coût et un score environnemental réduits par rapport à l'aliment de référence, à l'exception du score de l'aliment MC pour la lignée CMJR-. Cela souligne le potentiel d'amélioration par ces formulations optimisées sur les besoins nutritionnels du troupeau, quel que soit le pilier considéré pour l'optimisation : économique, environnemental, ou les deux. Par ailleurs, dans nos conditions, l'accroissement de prix entre les aliments MC et MEC (< +5 %), et du score environnemental entre les aliments ME et MEC (+0,5 %) indique que les pertes liées à l'optimisation conjointe des deux piliers étaient relativement faibles.

L'aliment MEC était obtenu pour $w_t = 0,24$ pour la lignée CMJR- et $w_t = 0,44$ pour la lignée CMJR+. Le poids plus élevé pour le score environnemental de l'aliment MEC de la lignée moins efficace est certainement à mettre en relation avec les besoins nutritionnels plus faibles par unité d'EN, qui permettent l'incorporation d'ingrédients moins riches en AA, ayant, pour certains, de plus faibles impacts environnementaux. En dépit de cette différence de pondération, le score environnemental des aliments MEC était similaire pour les deux lignées et le coût légèrement inférieur pour l'aliment CMJR+.

Ces résultats dépendent fortement de la composition de l'objectif à optimiser. Dans notre étude, tous les objectifs des aliments optimisés ont été normalisés relativement aux prix et impacts environnementaux des aliments MC, considérés comme référence. Par ailleurs, en raison des différences d'unités entre les différents objectifs considérés, les

4 dimensions environnementales ont été pondérées avec des poids égaux de façon arbitraire, et les volets économiques et environnementaux ont été minimisés selon une stratégie d'optimisation multi-objectif. La monétarisation des impacts environnementaux ou des choix stratégiques déterminés permettraient de lever l'arbitraire de ce choix.

Tableau 2 – Moyenne (écart-type) des performances de croissance, d'ingestion et de composition corporelle à 120 kg de poids vif simulées avec InraPorc® pour les lignées à faible (CMJR-) ou forte (CMJR+) consommation moyenne journalière résiduelle nourries avec l'aliment expérimental de référence ou avec les aliments formulés par lignée à moindre coût (MC), moindre impact environnemental (ME) ou en minimisant les deux impacts (MEC) (n = 57 porcs/lignée)

		Reference	P ¹	MC	P	ME	P	MEC	P
Gain moyen quotidien, kg/d	CMJR-	0,80 (0,091)	ns	0,77 (0,089)	*	0,78 (0,089)	t	0,78 (0,090)	*
	CMJR+	0,83 (0,080)		0,80 (0,071)		0,81 (0,072)		0,82 (0,074)	
Consommation moyenne journalière, kg/d	CMJR-	1,99 (0,20)	***	2,06 (0,21)	ns	2,04 (0,21)	*	1,98 (0,20)	***
	CMJR+	2,17 (0,16)		2,08 (0,15)		2,13 (0,16)		2,16 (0,16)	
Indice de consommation, kg /kg gain	CMJR-	2,48 (0,21)	***	2,68 (0,17)	**	2,61 (0,19)	ns	2,53 (0,18)	**
	CMJR+	2,62 (0,21)		2,58 (0,17)		2,64 (0,18)		2,64 (0,19)	
Indice de conversion énergétique, MJ /kg gain	CMJR-	24,08 (2,06)	***	24,97 (1,66)	**	24,56 (1,81)	***	24,59 (1,79)	**
	CMJR+	25,46 (2,06)		25,96 (1,72)		25,84 (1,77)		25,60 (1,89)	
Taux de maigre des pièces, %	CMJR-	60,69 (2,19)	***	59,63 (1,86)	***	59,98 (2,01)	***	59,95 (1,99)	***
	CMJR+	58,52 (1,86)		57,68 (1,68)		57,80 (1,72)		58,04 (1,81)	
Poids de protéines, kg	CMJR-	19,51 (0,48)	***	19,29 (0,40)	***	19,38 (0,44)	***	19,35 (0,44)	***
	CMJR+	19,05 (0,41)		18,86 (0,37)		18,89 (0,37)		18,94 (0,39)	
Poids de lipides, kg	CMJR-	23,63 (3,37)	***	25,27 (2,87)	***	24,74 (3,09)	***	24,77 (3,06)	***
	CMJR+	26,99 (2,86)		28,27 (2,58)		28,08 (2,65)		27,71 (2,78)	
Épaisseur de lard dorsal, mm	CMJR-	15,82 (1,26)	***	16,43 (1,07)	***	16,24 (1,15)	***	16,25 (1,14)	***
	CMJR+	17,08 (1,07)		17,56 (0,96)		17,49 (0,99)		17,35 (1,04)	

¹P-valeur de l'effet lignée dans un test de Student appliqué pour chaque type d'aliment : *** P < 0,001 ; ** P < 0,01 ; * P < 0,05 ; t = P < 0,10 ; ns = non significatif

2.1.2. Performances individuelles en réponse aux aliments optimisés

Les moyennes et écarts-types des performances simulées par InraPorc® pour les lignées alimentées avec les aliments optimisés par lignée ou l'aliment de référence jusqu'à un poids vif de 120 kg sont présentés dans le Tableau 2. Avec l'aliment de référence, tous les indicateurs différaient entre lignées (P < 0,01) sauf le GMQ. Comme rapporté dans des études précédentes (voir revue de Gilbert *et al.*, 2017), les animaux CMJR- ingèrent moins, sont plus efficaces et plus maigres. Les différences d'IC ne se retrouvaient pas systématiquement avec les aliments optimisés, mais elles étaient significatives avec un indice de conversion énergétique, exprimé en MJ d'EN ingéré.

L'écart entre lignées pour le GMQ (~35g/j de moins en CMJR-), qui n'était pas significatif avec l'aliment de référence, est conservé numériquement et significatif avec les aliments optimisés, en lien peut être avec des écarts-types légèrement réduits. Les autres différences de performances entre lignées sont maintenues avec les aliments optimisés. Ces éléments indiquent que l'optimisation des formules alimentaires a bien respecté les contraintes nutritionnelles, n'affectant pas de façon importante les performances obtenues en dépit du choix de la moyenne des maxima individuels comme référence pour chaque lignée, qui aurait pu entraîner une restriction alimentaire pour certains individus en début de période d'engraissement.

Tableau 3 – Moyenne (écart-type) des impacts environnementaux (par kg de porc vif) et des résultats économiques par porc de 120 kg de lignées à faible (CMJR-) ou forte (CMJR+) consommation moyenne journalière résiduelle nourries avec un aliment de référence ou formulé par lignée à moindre coût (MC), moindre impact environnemental (ME) ou en minimisant les deux impacts (MEC)

		Référence	P ¹	MC	P	ME	P	MEC	P
Potentiel de changement climatique, kg CO ₂ eq	CMJR-	2,07 (0,124)	***	2,02 (0,095)	***	1,96 (0,098)	*	1,96 (0,096)	***
	CMJR+	2,21 (0,125)		2,09 (0,096)		2,00 (0,092)		2,02 (0,098)	
Potentiel d'acidification, g SO ₂ eq	CMJR-	36,8 (2,78)	***	33,1 (1,99)	***	35,6 (2,37)	*	34,6 (2,26)	***
	CMJR+	40,0 (2,79)		37,1 (2,22)		36,5 (2,22)		35,3 (2,23)	
Potentiel d'eutrophisation, g P eq	CMJR-	1,16 (0,077)	***	1,39 (0,079)	***	1,27 (0,077)	***	1,36 (0,083)	*
	CMJR+	1,24 (0,077)		1,56 (0,092)		1,39 (0,081)		1,40 (0,089)	
Occupation des sols, m ² an	CMJR-	4,30 (0,30)	***	4,35 (0,25)	***	3,53 (0,21)	***	3,89 (0,23)	***
	CMJR+	4,58 (0,30)		3,97 (0,22)		4,17 (0,24)		4,22 (0,25)	
Produit, €	CMJR-	11,10 (5,83)	*	17,75 (5,56)	**	16,28 (5,75)	**	16,86 (5,68)	ns
	CMJR+	8,50 (6,82)		14,47 (7,01)		12,73 (7,32)		15,58 (5,64)	

¹P-valeur de l'effet lignée dans un test de Student appliqué pour chaque type d'aliment : *** P < 0,001 ; ** P < 0,01 ; * P < 0,05 ; ns = non significatif

2.1.3. Évaluations environnementale et économique globales

Les performances des animaux de chaque lignée, nourris avec les différents aliments optimisés, ont été utilisées pour évaluer

les impacts environnementaux et économiques pour l'obtention d'un kg de porc vivant avant abattage (Tableau 3). Pour chaque type d'aliment, tous les impacts environnementaux différaient entre les lignées (P < 0,05). Seul

l'OS était plus faible pour la lignée CMJR+ avec l'aliment MC, conduisant à des impacts environnementaux réduits pour la lignée CMJR- en moyenne, respectivement, de 7,21 %, 8,11 %, 4,91 % et 4,29 % pour les aliments de référence, MC, ME, et MEC par rapport à la lignée CMJR+. Par conséquent, cette différence entre lignées a été réduite par l'optimisation environnementale de la composition des aliments, permettant même, pour les aliments ME, d'obtenir des différences de CC et EP entre lignées réduites à 2 % de ces impacts. Au contraire, la différence d'occupation des sols est augmentée pour les scénarios avec ME et MEC, en lien avec l'incorporation accrue de pois, d'huile de tournesol et de thréonine de synthèse, à plus faible OS, dans ces aliments pour la lignée CMJR+. Sauf pour EP, les scénarios où les animaux sont nourris avec un aliment optimisé permettent pour les deux lignées de réduire l'impact environnemental par rapport aux scénarios avec l'aliment de référence.

Le résultat économique par porc était augmenté de 46 % à 83 % pour les scénarios avec des aliments optimisés par rapport aux scénarios avec l'aliment de référence, soulignant le potentiel de ces optimisations de formulation pour consolider le revenu de l'éleveur. De plus, pour tous les scénarios sauf avec MEC, le résultat économique par porc était supérieur de plus de 20 % pour la lignée CMJR- par rapport à la lignée CMJR+ ($P < 0,05$). Dans la lignée CMJR-, le résultat maximum était obtenu avec l'aliment MC (17,75 €/porc), alors que pour la lignée CMJR+ il est obtenu avec l'aliment MEC (15,58 €/porc), en raison certainement de qualités de carcasse légèrement meilleures avec cet aliment. Finalement, les résultats économiques moyens avec les aliments optimisés selon les deux piliers de la durabilité étaient statistiquement similaires pour les deux lignées, suggérant que ces stratégies d'optimisation raisonnables permettent de trouver des marges économiques substantielles même avec des animaux génétiquement moins performants, de type CMJR+. Si l'on considère de plus que les formulations d'aliments tenant compte des besoins nutritionnels des troupeaux et de l'impact environnemental des ressources alimentaires permettent de compenser partiellement les moins bons impacts environnementaux de ces animaux moins efficaces, des stratégies intégrant génétique et nutrition peuvent être dégagées pour améliorer conjointement deux des piliers de la durabilité des systèmes de production porcins. Il est à noter que les animaux les plus efficaces restent néanmoins dans tous les scénarios ceux qui ont les résultats les plus favorables sur les deux piliers, à condition de bénéficier de régimes alimentaires adaptés à leurs besoins. Des travaux précédents ont montré une forte dégradation de la vitesse de

croissance et de la composition corporelle de ces individus s'ils sont alimentés avec un aliment correspondant aux besoins nutritionnels des CMJR+, ce qui aurait vraisemblablement des impacts économiques et environnementaux défavorables (Brossard *et al.*, 2012).

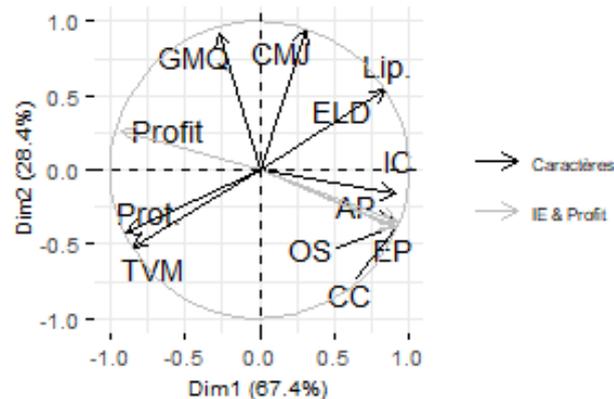


Figure 1 – Projection des performances, impacts environnementaux (IE) et résultat économique (profit) selon les deux premiers axes d'une analyse en composantes principales après ajustement pour l'effet lignée ($n = 114$ porcs)

CMJ = consommation moyenne journalière ; GMQ = gain moyen quotidien ; Prot. = quantité de protéines à l'abattage ; Lip. = quantité de lipides à l'abattage ; TMP = taux de muscle des pièces ; ELD = épaisseur de lard dorsal ; IC = indice de consommation ; CC = potentiel de changement climatique ; AP = potentiel d'acidification ; EP = potentiel d'eutrophisation ; OS = occupation des sols

2.1.4. Corrélations entre performances, impacts environnementaux et résultat économique

Les évaluations individuelles obtenues grâce à ces modèles ACV et bioéconomique permettent d'estimer les corrélations entre les différents résultats des modèles (Figure 1). Les corrélations les plus élevées avec les impacts environnementaux et les résultats économiques étaient obtenues pour l'IC ($> 0,82$) quelle que soit la combinaison de lignée et d'aliment considérée. Ces estimations consolident les conclusions du paragraphe précédent, et sont conformes aux résultats de la littérature pour les porcs (Monteiro *et al.*, 2020) ou dans certains systèmes de production piscicoles (Besson *et al.*, 2020). Les caractères marqueurs de la quantité de dépôt protéique pendant la croissance avaient aussi des corrélations élevées avec les impacts environnementaux et le résultat économique ($> 0,61$), en lien avec les contraintes de formulation et les règles de paiement des carcasses.

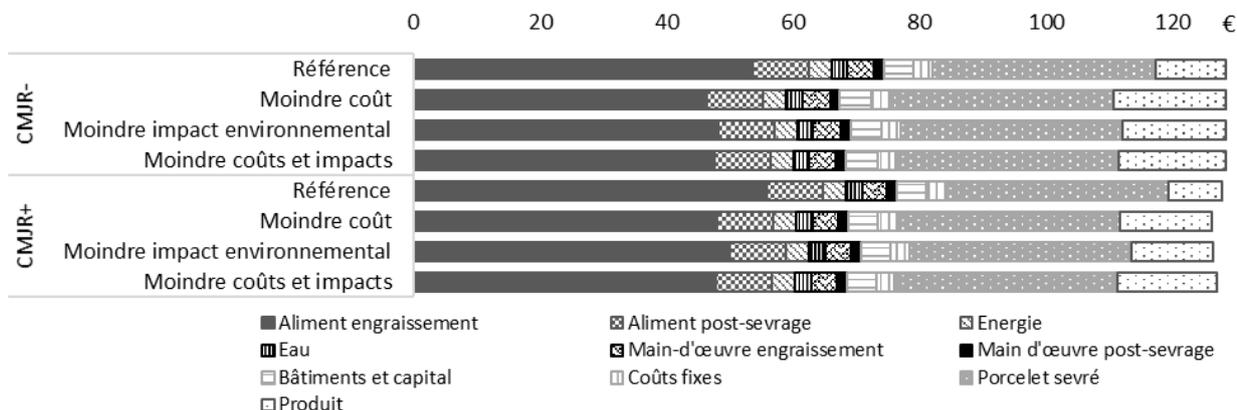


Figure 2 – Coûts élémentaires et résultat économique pour un porc de 120 kg au départ à l'abattoir

2.1.5. Structure des coûts

La structure des coûts de production des porcs pour chaque scénario est présentée sur la Figure 2. Pour les deux lignées, l'utilisation d'un aliment optimisé réduisait d'au moins 10 % les coûts alimentaires pendant l'engraissement ($P < 0,001$). Pour un type d'aliment donné, ces coûts alimentaires étaient plus faibles ($P < 0,05$) pour la lignée CMJR- que pour la lignée CMJR+, sauf avec les aliments MEC (coûts équivalents dans les deux lignées). Les autres postes de coûts ne différaient pas entre lignées ou aliments pour les scénarios retenus, soulignant l'importance stratégique du coût alimentaire dans l'optimisation des systèmes de production porcins, et la marge dégagée par l'éleveur. Avec ces aliments optimisés, les marges accrues permettent par ailleurs à l'éleveur de faire face à de plus grandes variations du prix payé par animal : dans le scénario le plus pessimiste (porcs CMJR+ avec l'aliment de référence), la marge est nulle si le prix du porc est réduit de 6,6 %, alors que dans le scénario le plus favorable (porcs CMJR- et aliment MC), la marge est nulle pour un changement de 13,8 % du prix du porc. Si on se fie à l'évolution du prix du porc depuis 2007 (<https://rnm.franceagrimer.fr/prix?PORC>), toutes choses étant égales par ailleurs, cela revient à diviser par 2,3 le nombre de semaines où le prix moyen du porc ne permet pas à l'éleveur de dégager une marge positive (15 % contre 34 % des semaines pour ces deux scénarios).

3. CONCLUSION

L'efficacité alimentaire a le potentiel d'améliorer plusieurs piliers de la durabilité des élevages et ce, d'autant plus efficacement que les leviers génétiques et nutritionnels sont

combinés. Les modèles proposés ici permettent d'envisager la prise en compte de plusieurs piliers de la durabilité dans les objectifs de sélection, grâce à des évaluations individuelles qui permettent l'estimation des corrélations entre critères de sélection actuels, définis d'après des critères économiques, et de nouveaux indicateurs, environnementaux. La combinaison d'objectifs formulés dans des unités différentes selon la dimension considérée reste cependant une difficulté pour le choix de pondérations relatives. En particulier, notre étude suggère que cette stratégie permet une meilleure valorisation économique des animaux moins efficaces grâce au recrutement de matières premières différentes. L'optimisation des systèmes de production pour satisfaire les différents piliers de la durabilité pourrait donc s'appuyer sur l'utilisation d'algorithmes multi-objectifs pour répondre plus efficacement aux différents niveaux de contraintes. Pour aller plus loin, ces optimisations combinant les objectifs économiques et environnementaux pourraient être réalisées en fonction de la dynamique de croissance des animaux, tendant ainsi vers des stratégies individualisées proches de l'alimentation de précision. L'intégration des différents piliers de ces optimisations permettrait alors d'atteindre une efficacité globale des systèmes de production.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du soutien de l'ANR via l'appel d'offre ERANet SusAn (projet SusPig, contrat ANR-16-SUSN-0005) pour le financement de la thèse de T. Soleimani et le développement des modèles. Elle a été réalisée pour partie lors du séjour de T. Soleimani à l'AGBU fin 2019, en collaboration avec S. Hermes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Brossard L., Gilbert H., Billon Y., van Milgen J., 2012. Effet d'une sélection divergente pour la consommation journalière résiduelle chez le porc en croissance sur la réponse à une carence en acides aminés. Journées Rech. Porcine, 44, 165-170.
- Brossard L., Vautier B., van Milgen J., Salaun Y., Quiniou N., 2014. Comparison of in vivo and in silico growth performance and variability in pigs when applying a feeding strategy designed by simulation to control the variability of slaughter weight. Anim. Prod. Sci., 54, 1939-1945.
- Besson M., Komen H., Rose G., Vandeputte M., 2020. The genetic correlation between feed conversion ratio and growth rate affects the design of a breeding program for more sustainable fish production. Genet. Sel. Evol., 52, 5.
- Calderón Díaz J.A., Shalloo L., Niemi J.K., Kyriazakis I., McKeon M., McCutcheon G., Bohan A., Manzanilla E.G., 2019. Description, evaluation, and validation of the Teagasc Pig Production Model. J. Anim. Sci., 97, 2867-2885.
- Espagnol S., Delage C., Royer É., Dauguet S., Jensen S.K., Garcia-Launay F., 2020. Analyse environnementale de l'utilisation de sources de protéines européennes pour l'alimentation porcine. Journées Rech. Porcine, 52, 337-342.
- Garcia-Launay F., Dusart L., Espagnol S., Laisse-Redoux S., Gaudré D., Méda B., Wilfart A., 2018. Multi-objective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. Br. J. Nutr., 120, 1298-1309.
- Gilbert H., Bidanel J.P., Billon Y., Lagant H., Guillouet P., Sellier P., Noblet J., Hermes S., 2012. Correlated responses in sow appetite, residual feed intake, body composition, and reproduction after divergent selection for residual feed intake in the growing pig. J. Anim. Sci., 90, 1097-1108.
- Gilbert H., Billon Y., Brossard L., Faure J., Gatellier P., Gondret F., Labussière E., Lebret B., Lefaucheur L., Le Floch N., Louveau I., Merlot E., Meunier-Salaün M.C., Montagne L., Mormede P., Renaudeau D., Riquet J., Rogel-Gaillard C., van Milgen J., Vincent A., Noblet J., 2017. Review: divergent selection for residual feed intake in the growing pig. Animal, 11, 1427-1439.
- IFIP Institut de la Filière porcine, 2020. Note de conjoncture Aliment Avril.
- IFIP Institut de la Filière porcine, 2014. La consommation d'eau en élevage de porcs et Les consommations énergétiques dans les bâtiments porcins par IFIP-Institut de la Filière porcine. <https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/abreuvement-elevages-porc-ifip.pdf>, https://bio-e-co.fr/wp-content/uploads/2018/11/consommation_energie_elevage_porcs.pdf.
- Monteiro A., Brossard L., Gilbert H., Dourmad J.Y., 2020. Relations entre les impacts environnementaux, l'excrétion et les performances, chez le porc à l'engrais. Journées Rech. Porcine, 52, 353-354.
- Sauvant D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables of composition and nutritional value of feed materials. Wageningen Academic Publishers.
- Soleimani T., Gilbert H., 2020a. Evaluating the environmental impacts of selection for residual feed intake in pig. Animal, DOI: <https://doi.org/10.1017/S175173112000138X>.
- Soleimani T., Gilbert H., 2020b. An approach to achieve overall farm feed efficiency in pig production: environmental evaluation through individual life cycle assessment. Int. J. Life Cycle Assess, en révision.
- 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, e0167343.