

Une formulation multiobjectif pour réduire les impacts environnementaux des aliments pour porcs charcutiers

Florence GARCIA-LAUNAY (1), Aurélie WILFART (2), Léonie DUSART (3), Cyrille NZALLY (1), Didier GAUDRE (4), Sarah LAISSE-REDOUX (5), Sandrine ESPAGNOL (4)

(1) PEGASE, INRA, Agrocampus-Ouest, 35590 Saint-Gilles, France

(2) SAS, INRA, Agrocampus Ouest, 35042 Rennes, France

(3) ITAVI, 37380 Nouzilly, France

(4) IFIP, Institut du porc, BP 35104, 35651 Le Rheu, France

(5) Institut de l'Elevage, Monvoisin, 35652 Le Rheu Cedex, France

Florence.garcia-launay@inra.fr

Avec la collaboration d'Yves Dronne, consultant auprès de Feedsim Avenir

Une formulation multiobjectif pour réduire les impacts environnementaux des aliments

Les matières premières (MP) utilisées dans l'alimentation contribuent majoritairement aux impacts changement climatique, consommation d'énergie et utilisation des terres du kg de porc produit. La méthode traditionnelle de formulation (MinPrix) minimise le coût du mélange des MP, sans considérer les impacts environnementaux. L'objectif de cette étude était de développer une méthode de formulation multiobjectif (MinMO) minimisant à la fois le prix et les impacts environnementaux des MP calculés par Analyse du Cycle de Vie. Le modèle de programmation linéaire construit recherche la meilleure formule d'aliment sous contraintes nutritionnelles et de disponibilité des MP avec une fonction multiobjectif qui inclut un index de prix et un index environnemental. Un facteur de pondération de l'index environnemental (α) et de l'index de prix ($1-\alpha$), a été inclus à la fonction. Les impacts des MP proviennent du jeu de données ECOALIM inclus dans AgriBalyse® v1.3. Des aliments croissance et finition ont été formulés avec 2 scénarios de disponibilité des MP (disponibilité actuelle limitée LIM ou disponibilité accrue NLIM) selon une formulation MinPrix et une formulation MinMO. En NLIM-MinPrix vs. LIM-MinPrix l'index environnemental est réduit en moyenne de 3% et l'index de prix de 1%. En MinMO avec $\alpha=0,5$ vs. MinPrix, l'index environnemental des deux aliments diminue de 10% en LIM et de 22% en NLIM. Simultanément, le prix du mélange augmente de 1,5% en LIM et de 1,7% en NLIM. Pour α supérieur à 0,5, l'index environnemental n'est quasiment plus réduit. La formulation multiobjectif semble être une méthode efficace pour produire des aliments à impacts réduits. Les résultats seront modulés dans le futur en tenant compte des besoins accrus en certaines MP et des interactions possibles avec les besoins des autres espèces animales.

Multi-objective formulation to reduce the environmental impacts of pig feeds

The production of feed ingredients for pig feeds has a major contribution to climate change, energy use and the land occupation impacts of the animal products. Nonetheless, the traditional least-cost (LC) feed formulation methods minimize the cost of the feed mix, without consideration of its environmental impacts. The objective of this study was to estimate the potential mitigation of environmental impacts calculated by Life Cycle Assessment through a multi-objective formulation (MinMO) of pig feeds. The linear programming model built searches the best feed formula under nutritional constraints with a multi-objective function including an economic price index and an environmental impact index. A weighting coefficient α of the environmental index and $(1-\alpha)$ of the price index has been included for the objective function. Impact values of feed ingredients came from the ECOALIM dataset of AgriBalyse® v1.3. Growing and finishing feeds were formulated within two scenarios of feed ingredient availability (current limited LIM, increased NLIM) with LC formulation and MinMO formulation. In NLIM-LC vs. LIM-LC the environmental index is reduced on average by 3% and the price index by 1%. In MinMO with $\alpha=0.5$ vs. LC, the environmental index of both feeds decreases by 10% in LIM and 22% in NLIM. Simultaneously, the price of the feed mix increases by 1.5% in LIM and 1.7% in NLIM. For α higher than 0.5, the environmental index is not further reduced. Multi-objective formulation of pig feeds may be an efficient method to produce low-impact feeds. Further work will account for the additional needs for some feed ingredients and possible interactions with the requirements for the other livestock species, at the territory level.

INTRODUCTION

Les systèmes de production porcine (SPP) font face à des enjeux économiques, environnementaux et sociétaux. Les SPP sont associés à plusieurs impacts environnementaux tels que le changement climatique, l'occupation des terres, ou encore l'eutrophisation, particulièrement dans des territoires à forte densité d'animaux d'élevage (Bretagne, Pays-Bas...). L'envolée des prix des matières premières (céréales et tourteaux issus de cultures oléo-protéagineuses) utilisées pour l'alimentation animale et la volatilité des prix des produits animaux réduisent respectivement le niveau moyen et la stabilité de la marge des producteurs de porcs (EC, 2013).

Dans ce contexte, les aliments représentent entre 60 et 70% du coût de production chez les naisseurs-engraisseurs et la production des aliments est le principal contributeur aux impacts changement climatique (55%-75%), consommation d'énergie (70%-90%) et occupation des terres (85%-100%) du kg de porc produit (Basset-Mens, van der Werf, 2005; Dourmad *et al.*, 2014). La formulation d'aliments à faibles impacts devrait donc permettre de réduire les impacts environnementaux du kg de porc vif. Le prix d'un aliment et ses impacts environnementaux sont déterminés par sa composition en matières premières (MP). Certaines MP, comme le tourteau de soja, peuvent représenter plus de 10% de l'aliment et sont caractérisées par des impacts et un prix relativement élevés (Wilfart *et al.*, 2016). D'autres sont incorporées en très petites quantités dans les aliments mais ont des impacts environnementaux élevés, e.g. les acides-aminés industriels et le phosphate monocalcique (Garcia-Launay *et al.*, 2014). D'autres encore, comme les coproduits d'industrie agro-alimentaire ou certains protéagineux utilisés en quantités modestes présentent des impacts moindres (Wilfart *et al.*, 2016).

La méthode habituelle de formulation des aliments (**MinPrix**) minimise le prix du mélange, sans considération de ses impacts environnementaux. La formulation à moindre coût incorpore les matières premières pour respecter des minimums/maximums d'apports nutritionnels en minimisant le prix au moyen d'un modèle de programmation linéaire. Cependant, l'optimum économique ne correspond pas nécessairement à l'optimum environnemental (Morel *et al.*, 2012; Pomar *et al.*, 2007). La formulation d'aliments à moindres impacts ou éco-aliments nécessite donc une approche alternative à la formulation à moindre coût.

Les objectifs de cette étude étaient de développer une méthode de formulation multiobjectif des aliments, utilisant les impacts environnementaux des MP calculés par Analyse du Cycle de Vie (ACV), et d'illustrer son potentiel pour réduire les impacts des aliments pour porcs charcutiers.

1. MATERIEL ET METHODES

L'optimisation multiobjectif (**MinMO**) des formules des aliments avec des indicateurs économiques et environnementaux a été choisie pour éviter des transferts de pollution entre impacts et pour produire des formules d'aliments compatibles avec les pratiques des fabricants d'aliments.

La méthode MinMO calcule les teneurs en nutriments, le prix et les impacts environnementaux par ACV de l'aliment

considéré, à partir des caractéristiques de chaque MP et des taux d'incorporation associés.

1.1. Caractéristiques des matières premières des aliments

Les impacts environnementaux calculés par ACV des MP sont ceux du jeu de données ECOALIM de la base AGRIBALYSE® v1.3. (Wilfart *et al.*, 2016) et incluent la demande en phosphore (**DP**, en kg P / kg de MP), le changement climatique ILCD comprenant les changements d'utilisation des terres (**CC**, en kg de CO₂-eq/kg de MP), l'acidification ILCD (**AC**, en molH⁺-eq/kg de MP), l'eutrophisation CML (**EU**, en kgPO₄³⁻-eq/kg de MP), la demande cumulée en énergie non renouvelable CED v1.08 (**EN**, en MJ / kg de MP) et l'occupation des terres CML (**OT** en m².an / kg de MP). Les impacts associés au transport des MP depuis les organismes stockeurs jusqu'à l'usine de fabrication d'aliments ont été ajoutés avec des données d'arrière-plan issues de la base attributionnelle Ecoinvent v3.1. (Weidema *et al.*, 2013) en considérant les distances moyennes entre la production d'aliments dans le Grand-Ouest et i) les zones principales de cultures céréalières, ii) les ports d'importation des tourteaux et iii) les industries de meunerie et de l'amidonnerie. Les teneurs en différents nutriments des MP proviennent des tables des valeurs des aliments (Sauvant *et al.*, 2004) excepté pour quelques coproduits pour lesquels les données ont été fournies par les instituts techniques partenaires. Tous les impacts ont été considérés à l'entrée de l'usine de fabrication des aliments.

1.2. Le modèle de formulation multiobjectif des aliments

Le tableau 1 synthétise les entrées et les sorties du modèle. La formulation MinMO développée repose sur deux étapes de programmation linéaire (Figures 1 et 2) : la première produit une formule de référence par formulation MinPrix (Figure 1) et la deuxième recherche la solution du problème de formulation multiobjectif (Figure 2). Dans chaque étape, les taux d'incorporation de chaque MP sont déterminés sous une série de contraintes linéaires en minimisant une fonction-objectif.

Formulation à moindre coût (MinPrix)

$$\begin{array}{l}
 \min C = ACout \\
 \left[\begin{array}{c} MinNut_1 \\ \vdots \\ MinNut_p \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} ANut_{1ref} \\ \vdots \\ ANut_{pref} \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} MaxNut_1 \\ \vdots \\ MaxNut_p \end{array} \right] \\
 \left[\begin{array}{c} MinTaux_1 \\ \vdots \\ MinTaux_n \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} MaxTaux_1 \\ \vdots \\ MaxTaux_n \end{array} \right] \\
 [Cout_1 \dots Cout_n] \times \left[\begin{array}{c} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{array} \right] = ACout_{ref} \\
 \left[\begin{array}{ccc} Nut_{11} & \dots & Nut_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Nut_{1p} & \dots & Nut_{np} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{array} \right] = [ANut_{1ref} \dots ANut_{pref}] \\
 \left[\begin{array}{ccc} ACV_{11} & \dots & ACV_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ACV_{1q} & \dots & ACV_{nq} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{array} \right] = [AACV_{1ref} \dots AACV_{qref}]
 \end{array}$$

Figure 1 – Première étape du modèle MinMO pour définir la formule de référence.

Tableau 1 – Description des entrées et des sorties du modèle.

Entrées du modèle	Description
$\begin{bmatrix} Nut_{11} & \dots & Nut_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Nut_{1p} & \dots & Nut_{np} \end{bmatrix}$	Matrice des teneurs en chaque nutriment j de chaque MP i (g/kg de MP).
$\begin{bmatrix} ACV_{11} & \dots & ACV_{qn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ACV_{1q} & \dots & ACV_{nq} \end{bmatrix}$	Matrice des impacts environnementaux de chaque catégorie k pour chaque MP i (/kg de MP).
$\begin{bmatrix} MinNut_1 \\ \vdots \\ MinNut_p \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} MaxNut_1 \\ \vdots \\ MaxNut_p \end{bmatrix}$	Vecteurs des contraintes nutritionnelles minimales et maximales de l'aliment. (/kg d'aliment).
$\begin{bmatrix} MinTaux_1 \\ \vdots \\ MinTaux_n \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} MaxTaux_1 \\ \vdots \\ MaxTaux_n \end{bmatrix}$	Vecteurs des contraintes minimales et maximales d'incorporation de chaque MP i (g/kg d'aliment).
$\begin{bmatrix} 105\% \times AACV_{1ref} \\ \vdots \\ 105\% \times AACV_{qref} \end{bmatrix}$	Vecteur des contraintes maximales sur les impacts (/kg d'aliment).
$[Cout_1 \dots Cout_n]$	Vecteur de coût de chaque MP i (€/kg de MP).
Sorties du modèle	Description
$\begin{bmatrix} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} Taux_{1ref} \\ \vdots \\ Taux_{nref} \end{bmatrix}$	Vecteurs des taux d'incorporation des MP après formulation MinPrix ($Taux_{ref}$) et après MinMO ($Taux_i$) (g/kg d'aliment).
$\begin{bmatrix} ANut_1 \\ \vdots \\ ANut_p \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} ANut_{1ref} \\ \vdots \\ ANut_{pref} \end{bmatrix}$	Vecteurs des teneurs en nutriments des formules après formulation à moindre coût ($ANut_{ref}$) et MinMO ($ANut_j$) (/kg d'aliment).
$[AACV_{1ref} \dots AACV_{qref}]$ et $[AACV_1 \dots AACV_q]$	Vecteur des impacts environnementaux de la formule à moindre coût ($AACV_{kref}$) et de la formule obtenue après MinMO ($AACV_k$) (/kg d'aliment).

La première étape (Figure 1) est une formulation MinPrix qui détermine la formule de référence. La fonction-objectif correspond au coût de l'aliment calculé comme la somme des coûts de MP incorporées multipliés par leurs taux d'incorporation respectifs. L'algorithme d'optimisation cherche les taux d'incorporation qui minimisent la fonction-objectif en couvrant les besoins nutritionnels du porc et sous contraintes de taux d'incorporation des MP. Les contraintes minimales de teneurs en acides aminés DIS ont été calculées en accord avec les recommandations du CORPEN (2003) et les profils en acides aminés proposés par van Milgen et al. (2008). Les taux d'incorporation minimum et maximum des MP ont été établis pour tenir compte de la disponibilité sur le marché de chaque MP et des contraintes de fabrication des aliments. Avec la formule de référence produite, les valeurs de référence de coût d'aliment, d'impacts environnementaux et de teneurs en nutriments ont été calculées.

La seconde étape (Figure 2) utilise les mêmes contraintes que la formulation MinPrix et calcule une fonction multiobjectif (MO) qui inclut le coût de l'aliment et des indicateurs d'impacts environnementaux. Tous les critères inclus dans la

fonction MO sont normalisés par leur valeur de référence calculée à partir de la formulation à moindre coût. La fonction MO inclut un index de prix qui est le coût de l'aliment normalisé et un index environnemental qui comprend 4 impacts environnementaux normalisés.

Formulation multiobjectif (MinMO)

$$\begin{cases} \min MO = (1 - \alpha) \frac{ACout}{ACout_{ref}} + \\ \alpha \left(\frac{2\beta \times AACV_1}{AACV_{1ref}} + \frac{\beta \times AACV_2}{AACV_{2ref}} + \frac{\beta \times AACV_3}{AACV_{3ref}} + \frac{\beta \times AACV_4}{AACV_{4ref}} \right) \\ \begin{bmatrix} MinNut_1 \\ \vdots \\ MinNut_p \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} ANut_1 \\ \vdots \\ ANut_p \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} MaxNut_1 \\ \vdots \\ MaxNut_p \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} MinTaux_1 \\ \vdots \\ MinTaux_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} MaxTaux_1 \\ \vdots \\ MaxTaux_n \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} AACV_1 \\ \vdots \\ AACV_q \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 105\% \times AACV_{1ref} \\ \vdots \\ 105\% \times AACV_{qref} \end{bmatrix} \\ [Cout_1 \dots Cout_n] \times \begin{bmatrix} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{bmatrix} = ACout \\ \begin{bmatrix} Nut_{11} & \dots & Nut_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Nut_{1p} & \dots & Nut_{np} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{bmatrix} = [ANut_1 \dots ANut_p] \\ \begin{bmatrix} ACV_{11} & \dots & ACV_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ACV_{1q} & \dots & ACV_{nq} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Taux_1 \\ \vdots \\ Taux_n \end{bmatrix} = [AACV_1 \dots AACV_q] \end{cases}$$

Figure 2 – Deuxième étape du modèle MinMO avec optimisation de la fonction multiobjectif.

Les impacts globaux pour lesquels l'aliment a une contribution majoritaire (Basset-Mens et van der Werf, 2005; Dourmad et al., 2014) ont été sélectionnés, pour être inclus dans la fonction MO : CC, DP, EN et OT. Les impacts CC, DP, EN, OT ainsi que EU et AC ont aussi été utilisés comme des contraintes du problème de formulation, leur valeur étant limitée à 105% de leur valeur de référence issue de l'étape 1 (Figure 1). La fonction MO inclut également deux facteurs de pondération, α et β . Le facteur α varie entre 0 et 1 et correspond au poids de l'index environnemental dans la fonction ($1-\alpha$ correspondant au poids complémentaire de l'index de prix). Le facteur β , égal à 0,2 dans notre équation, gère la pondération entre les 4 impacts environnementaux considérés ; une valeur 2β a été allouée à l'impact CC pour prendre en compte les engagements de réduction pris pour cet impact (Gerber et al., 2013). Ainsi la fonction MO, en faisant varier α entre 0 et 1, permet d'explorer le compromis entre objectifs économiques et environnementaux. L'évaluation du gain environnemental, du surcoût économique et des formules associées à MinMO a été faite pour une valeur seuil de α (α_{lim}). Cette dernière est la valeur pour laquelle la diminution marginale de l'index environnemental est égale à l'augmentation marginale de l'index prix.

1.3. Scénarios simulés

La méthode MinMO a été testée pour la formulation d'aliments croissance et finition de porcs charcutiers. Pour explorer la capacité de la méthode à formuler des aliments à moindres impacts, nous avons défini plusieurs scénarios qui tiennent compte de la variabilité des situations en France. Deux scénarios de disponibilité des MP (qui conduit à moduler

les contraintes maximales sur les taux d'incorporation des MP) et 4 scénarios économiques ont été considérés.

Les scénarios de disponibilité limitée (LIM) et de disponibilité améliorée (NLIM) ont été développés à partir de l'expertise des partenaires du projet et correspondent respectivement à la situation actuelle en France et à une disponibilité accrue et présumée réaliste des céréales (triticale 300g/kg, avoine 150 g/kg, sorgho 200g/kg) et de certaines MP telles que le pois (100g/kg LIM vs. 300 g/kg NLIM), la féverole (30 g/kg LIM vs. 100 g/kg NLIM) ou encore des coproduits (100 g/kg LIM vs. 200 g/kg en NLIM pour la plupart des coproduits du blé et du maïs). La liste des MP disponibles dans les scénarios LIM et NLIM est la même. Les 4 scénarios économiques ont été construits pour couvrir une gamme de situations contrastées et correspondent respectivement aux prix de marchés des MP de Septembre 2011, Juin 2012, Août 2013 et Février 2014. Ces 4 périodes ont été choisies car elles sont caractérisées par des prix différents de blé tendre, de maïs grain et de tourteau de soja déterminant des ratios de prix différents. Les prix des MP ont été obtenus dans La Dépêche-Le petit meunier (2011, 2012, 2013 et 2014) et auprès des partenaires du projet.

Les aliments des scénarios disponibilité LIM et formulation MinPrix (LIM-MinPrix), disponibilité LIM et formulation MO (LIM-MinMO), disponibilité accrue et formulation MinPrix (NLIM-MinPrix) et disponibilité accrue et formulation MinMO (NLIM-MinMO) ont été évalués pour les 4 scénarios économiques. Les aliments ont été formulés avec OpenSolver pour Excel (Mason, Dunning, 2010) qui réalise l'optimisation de modèles de programmation linéaire ayant un grand nombre de variables et de contraintes.

2. RESULTATS

Les résultats présentés sont des valeurs moyennes pour les 4 scénarios économiques.

2.1. Composition des aliments formulés

Quel que soit le scénario de disponibilité des MP, les proportions de céréales et de tourteaux dans les formules des aliments finition diminuent quand on passe d'une formulation MinPrix à une formulation MinMO.

La proportion des coproduits de blé et des graines protéagineuses augmente avec MinMO car l'association de ces deux types de matières premières présente des impacts environnementaux inférieurs à celle des céréales et des tourteaux. Leur proportion est en conséquence accrue entre LIM-MinMO et NLIM-MinMO en raison de la meilleure disponibilité en coproduits et légumineuses tels que le remoulage de blé, la farine basse de blé et le pois dans le scénario NLIM. Les mêmes points ont également été observés pour les aliments croissance.

2.2. Variations du coût de l'aliment et des impacts environnementaux avec la formulation multiobjectif

Les variations conjointes de l'index de prix et de l'index environnemental quand α varie entre 0 et 1 montrent un potentiel de réduction des impacts environnementaux qui s'accompagne d'un surcoût pour chacun des scénarios explorés (Figure 4). Quand $\alpha=0$, l'index de prix et l'index environnemental sont égaux à 1 car ce cas correspond à la formulation MinPrix (aucune réduction des impacts).

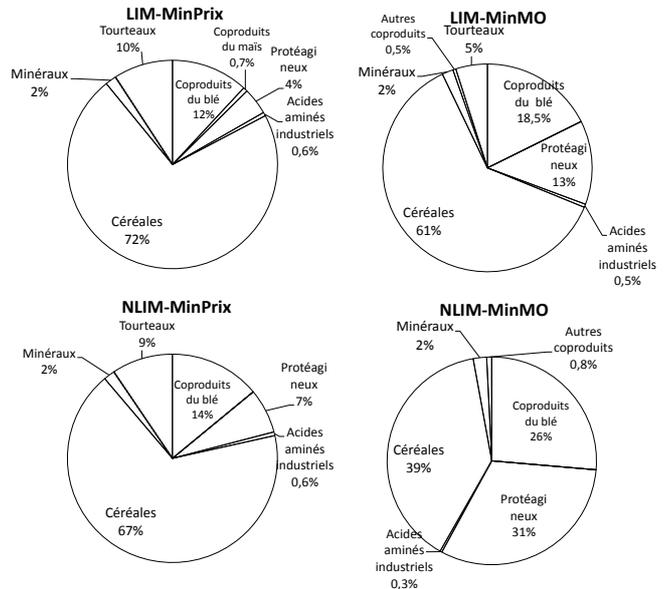


Figure 3 – Formules moyennes des aliments finition des scénarios LIM-MinPrix, NLIM-MinPrix, LIM-MinMO et NLIM-MinMO (avec $\alpha=\alpha_{lim}$), pour les 4 scénarios économiques.

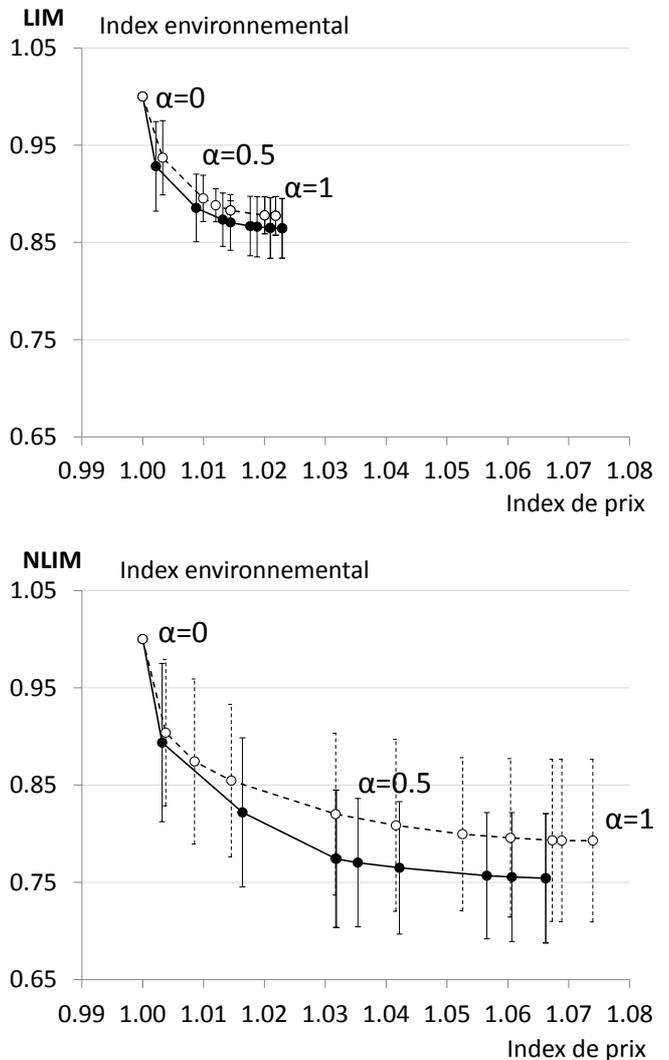


Figure 4 – Variation des index de prix et environnemental (moyennes et écart-types) selon le facteur α dans les scénarios LIM et NLIM lors de la formulation des aliments croissance (●, trait plein) et finition (○, trait pointillé).

Quand α varie entre 0 et 0,5, l'index de prix des aliments en NLIM augmente en moyenne de 2% tandis que l'index environnemental est réduit de 17 à 20%. Quand la valeur de α augmente encore, de 0,5 jusqu'à 1, l'index de prix augmente cette fois de 5 à 6% alors que l'index d'impact environnemental reste à peu près stable. En scénario NLIM on observe également que le potentiel de réduction de l'index environnemental est toujours plus élevé pour l'aliment croissance que pour l'aliment finition.

Les variations observées dans le scénario LIM sont du même type mais plus faibles qu'en scénario NLIM. La réduction de l'index environnemental atteint au maximum -13%, avec peu de différence entre l'aliment croissance et l'aliment finition. Cette forme de la relation entre l'index de prix et l'index d'impact environnemental indique que, dans notre contexte, il ne serait pas conseillé d'augmenter la valeur de α au-delà de 0,5 la réduction marginale d'impact devenant modeste alors que le coût continue d'augmenter.

Tableau 2 – Prix et impacts environnementaux moyens (\pm écart-type) d'une tonne d'aliment (40% croissance et 60% finition) selon les 4 scénarios étudiés, avec les variations (Δ MinMO vs. MinPrix) en MinMO (avec $\alpha = \alpha_{\text{lim}}$) en pourcentage relativement à MinPrix.

	Critères inclus dans la fonction MinMO					Critères hors fonction MinMO	
	Prix (€)	DP (kg P)	EN (MJ)	CC (kgCO ₂ -e)	OT (m ² .year)	AC (mol H ⁺)	EU (kg PO ₄ ³⁻)
LIM-MinPrix	216 (\pm 12,4)	3,4 (\pm 0,36)	5150 (\pm 568,7)	499 (\pm 18,2)	1418 (\pm 59,5)	9,7 (\pm 0,48)	3,6 (\pm 0,05)
Δ MinMO vs. MinPrix	+1%	-6%	-13%	-14%	-13%	-7%	-11%
LIM-MinMO	219 (\pm 12,5)	3,2 (\pm 0,15)	4475 (\pm 347,2)	427 (\pm 4,6)	1235 (\pm 16,4)	9,0 (\pm 0,57)	3,2 (\pm 0,03)
NLIM-MinPrix	214 (\pm 11,0)	3,6 (\pm 0,41)	4750 (\pm 503,9)	456 (\pm 64,1)	1514 (\pm 43,9)	8,3 (\pm 1,48)	3,4 (\pm 0,25)
Δ MinMO vs. MinPrix	+4%	-25%	-18%	-26%	-12%	-20%	-15%
NLIM-MinMO	222 (\pm 8,4)	2,7 (\pm 0,15)	3899 (\pm 290,5)	337 (\pm 11,5)	1325 (\pm 61,8)	6,6 (\pm 0,42)	2,9 (\pm 0,09)

En conséquence, le tableau 2 fournit les prix moyens et les impacts environnementaux moyens du mélange d'aliments formulés à $\alpha = \alpha_{\text{lim}}$. La valeur moyenne de α_{lim} en scénario LIM est de 0,57 et de 0,59 en scénario NLIM. Relativement à LIM-MinPrix, LiM-MinMO réduit tous les impacts environnementaux compris dans la fonction-objectif ainsi que l'eutrophisation et l'acidification, tout en augmentant légèrement le prix de l'aliment (+1%). Les gains environnementaux en LIM-MinMO par rapport à LIM-MinPrix sont minimaux pour DP (-6%) et maximaux pour CC (-14%). Comparativement à NLIM-MinPrix, NLIM-MinMO réduit tous les impacts environnementaux considérés d'au moins 12%, en augmentant le prix de l'aliment de 4%. Les réductions d'impacts atteignent -25% et -26% pour DP et CC, respectivement.

3. DISCUSSION

Cette étude propose une nouvelle méthodologie de formulation des aliments, qui intègre les impacts environnementaux calculés par ACV dans l'approche traditionnelle de formulation à moindre coût. Le développement de cette méthodologie de formulation multicritère nécessitait des modèles de calcul et des données sous-jacentes fiables et méthodologiquement homogènes dans la gamme de situations explorée pour s'assurer de la validité des formules optimisées. Le jeu de données ECOALIM utilisé répond à ces critères car il fournit des références d'impacts développées avec une méthode homogène pour les MP des aliments (Wilfart *et al.*, 2016).

Dans les scénarios illustrés ici, la réduction des impacts par optimisation multiobjectif a été obtenue en incorporant moins de tourteaux et de céréales et plus de coproduits et de graines protéagineuses (en particulier le pois) que dans les formules optimisées à moindre coût. En effet, les coproduits sont caractérisés par des impacts relativement faibles, associés en

partie à l'allocation économique des impacts adoptée dans ECOALIM, et le pois a des impacts inférieurs à ceux des tourteaux de soja et de colza par kg de MP (Wilfart *et al.*, 2016). La réduction des impacts est aussi améliorée par la disponibilité des MP quand on compare les formulations MinPrix et MinMO. Les réductions d'impacts obtenues en MinMO oscillent entre -12% et -26% en NLIM alors qu'elles varient entre -6% et -14% en contexte LIM. Cette observation suggère qu'un meilleur équilibre entre les différentes productions végétales serait bénéfique aux impacts environnementaux de la filière porcine. L'incorporation de deux index (index de prix et index environnemental) dans la fonction-objectif avec des facteurs de pondération permet d'explorer les relations entre prix de l'aliment et impacts environnementaux. Cette démarche donne à l'utilisateur final un aperçu du possible compromis qu'il peut faire entre prix de l'aliment et impacts. Dans nos scénarios, la réduction des impacts est intéressante pour $\alpha = \alpha_{\text{lim}}$ avec une augmentation du coût modérée et chacun peut facilement identifier qu'il n'y a pas de réduction supplémentaire substantielle possible au-delà de cette valeur limite de α . Ainsi l'utilisateur final peut choisir la pondération appropriée à son contexte entre l'index de prix et l'index environnemental. L'approche de formulation multiobjectif proposée repose sur la formulation à moindre coût classique pour sa première étape et reste donc proche des contraintes et des pratiques actuelles de formulation. La prise en compte du prix dans la formulation MinMO garantit aussi la production de formules en accord avec les préoccupations des utilisateurs finaux. L'incorporation de 4 impacts environnementaux dans la fonction-objectif limite le risque de transfert de pollution d'une catégorie d'impacts à une autre. Cependant dans certains cas, la faible diminution d'index environnemental observée entre $\alpha = \alpha_{\text{lim}}$ et $\alpha = 1$ était associée à une réduction supplémentaire de l'impact CC mais avec une augmentation simultanée de l'impact OT. En effet la réduction de cet index peut être associée à la réduction de certains impacts mais aussi à une (plus faible) augmentation

de certains autres. Dans notre étude, l'impact CC avec une pondération de 2β a compensé l'augmentation d'OT qui a une pondération de 1β . Cette observation met en évidence l'importance du choix des facteurs de pondération dans ce type de méthodologie. Quelques méthodes de formulation ont été proposées au cours des dernières années pour prendre en compte les impacts environnementaux de la production porcine (Castrodeza *et al.*, 2005; Mackenzie *et al.*, 2016; Pomar *et al.*, 2007) ou encore de la production avicole (Nguyen *et al.*, 2012). Castrodeza *et al.* (2005) et Pomar *et al.* (2007) ont focalisé leurs études sur la réduction de l'excrétion d'N et P qui sont associés aux émissions qui se produisent à la ferme. Nguyen *et al.* (2012) ont incorporé des impacts environnementaux des MP calculés par ACV comme contraintes dans leur problème de formulation à moindre coût d'aliment. L'étude la plus proche de la nôtre est celle de MacKenzie *et al.* (2016). Ces auteurs ont réalisé une optimisation environnementale sur un score incluant 4 impacts environnementaux en sortie de ferme et ont optimisé à la fois la composition en MP et les niveaux des nutriments pour réduire l'excrétion par les animaux. La méthodologie présentée ici est complémentaire de ces études précédentes. Elle permet de prendre en compte à la fois l'objectif économique qui reste primordial pour la filière et les objectifs environnementaux.

Les incorporations élevées de coproduits et de pois dans les formules NLIM-MinMO posent la question de la disponibilité des MP sur le territoire français. A l'échelle du Grand Ouest, les productions porcine, laitière et avicole sont juxtaposées et nécessitent des volumes de MP importants. Notre résultat pose donc la question des assolements et de la concurrence possible entre les différentes filières animales pour utiliser les MP à moindres impacts. Examiner les compromis entre approvisionnement de MP dans le Grand-Ouest et réduction des impacts dans les différentes filières animales permettrait d'estimer plus précisément les niveaux d'incorporation de pois

et de coproduits possibles. Une augmentation de la demande pour ces MP à l'échelle d'un territoire pourrait entraîner également une augmentation de leur prix. Les niveaux de réduction d'impacts possibles pour la filière devront donc être modulés par une étude à l'échelle territoriale.

CONCLUSION

La formulation multiobjectif des aliments pour porcs apparaît comme une approche capable de réduire les impacts associés à la production des aliments. Cette démarche renouvelle la traditionnelle méthode de formulation à moindre coût en fournissant une méthodologie plus en accord avec les enjeux actuels des productions animales.

Cette étude offre un exemple d'aide à la décision avec comme support l'ACV et met en évidence la nécessité de disposer d'inventaires de cycles de vie fiables et précis pour mettre en pratique des options de réduction des impacts.

La méthode de formulation MinMO est aussi appliquée en production de volailles de chair et en production bovine (pour les aliments concentrés pour vache laitière et jeunes bovins à l'engraissement) dans le projet ECOALIM, ce qui permettra d'explorer la généricité de son applicabilité. Les formules obtenues seront également évaluées d'un point de vue environnemental sur les produits animaux en sortie de ferme dans le cadre de ce projet.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Yves Dronne pour ses commentaires sur la méthodologie développée, ainsi que le CASDAR (partenariat et innovation-2012) et l'ADEME (ADEME REACTIF-2012, 1260C0061) pour le financement du projet ECOALIM.

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. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 105, 127-144.
- Castrodeza C., Lara P., Pena T., 2005. Multicriteria fractional model for feed formulation: economic, nutritional and environmental criteria. *Agricultural Systems*, 86, 76-96.
- Dourmad J.Y., Ryschawy J., Trousson T., Bonneau M., Gonzàlez 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.
- EC, 2013. Prospects for Agricultural Markets and Income in the EU 2013-2023. 138 p.
- 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. *Livestock Science*, 161, 158-175.
- Gerber P.J., Steinfield H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci A., Tempio G., 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. 139 p.
- 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. *British Journal of Nutrition*, 115, 1860-1874.
- Mason A.J., Dunning I., 2010. OpenSolver: Open Source Optimisation for Excel. Proc. Conference "Annual Conference of the Operations Research Society of New Zealand", Auckland, New Zealand, pp. 181-190.
- Morel P.C.H., Sirisatien D., Wood G.R., 2012. Effect of pig type, costs and prices, and dietary restraints on dietary nutrient specification for maximum profitability in grower-finisher pig herds: A theoretical approach. *Livestock Science*, 148, 255-267.
- Nguyen T.T.H., Bouvarel I., Ponchant P., van der Werf H.M.G., 2012. Using environmental constraints to formulate low-impact poultry feeds. *Journal of Cleaner Production*, 28, 215-224.
- Pomar C., Dubeau F., Letourneau-Montminy M.P., Boucher C., Julien P.O., 2007. Reducing phosphorus concentration in pig diets by adding an environmental objective to the traditional feed formulation algorithm. *Livestock Science*, 111, 16-27.
- van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.-Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 143, 387-405.
- Wilfart A., Dauguet S., Tailleux A., Willmann S., Laustriat M., Magnin M., Garcia-Launay F., Gac A., Espagnol S., 2016. ECOALIM: a dataset of the environmental impacts of feed ingredients used for animal production in France. Proc. Conference "LCA Food 2016", Dublin, Ireland, n°277, 8 pp.