

LA FORMULATION MULTIOBJECTIF : UNE METHODE ORIGINALE ET EFFICACE POUR FORMULER DES ALIMENTS ECOLOGIQUES ET ECONOMIQUES

**Dusart Léonie¹, Garcia-Launay Florence², Wilfart Aurélie³, Méda Bertrand⁴, Bouvarel
Isabelle¹, Espagnol Sandrine⁵**

¹ITAVI - Centre INRA Val de Loire, 37380 NOUZILLY

²UMR PEGASE, INRA, Agrocampus Ouest - Domaine de la Prise, 35590 SAINT-GILLES

³UMR SAS, INRA, Agrocampus Ouest - 65 rue de Saint Briec, 35000 RENNES

⁴URA, INRA - Centre INRA Val de Loire, 37380 NOUZILLY

⁵IFIP - La Motte Vicomte, 35650 LE RHEU

dusart@itavi.asso.fr

RÉSUMÉ

Dans un contexte de discussions sur les impacts environnementaux des élevages, la méthode de formulation à moindre coût s'avère inadaptée pour intégrer efficacement des attentes environnementales. Cette étude visait à développer une méthode de formulation multiobjectif pour les différentes espèces (volailles, porcs et bovins). La formulation multiobjectif combine des critères environnementaux (indicateurs ACV) et un critère économique (prix), permettant ainsi l'identification d'éco-aliments. Un coefficient pondérateur permet de donner plus ou moins de poids aux critères économique et environnementaux. La recherche du coefficient optimal au-delà duquel l'augmentation marginale du prix est supérieure à la réduction marginale des impacts environnementaux permet d'identifier le meilleur compromis. Par exemple, dans le cas d'un scénario de disponibilité non limitante des matières premières, une réduction significative moyenne de 9 %, 23 %, 19 % et 16 % peut être attendue respectivement pour les impacts " consommation de phosphore ", " utilisation d'énergie primaire non-renouvelable ", " changement climatique " et " acidification " à l'échelle de l'aliment poulet de chair. L'impact " occupation des terres " reste inchangé tandis que l'impact " eutrophisation " tend à diminuer, et cela pour une faible augmentation du prix (+2 %). Les éco-aliments formulés sont notamment caractérisés par une teneur plus importante en coproduits. La formulation multiobjectif permet ainsi d'envisager une réduction efficace des impacts environnementaux potentiels des aliments poulet de chair tout en évitant les transferts de pollutions.

ABSTRACT

Multiobjective feed formulation: a novel and efficient method to formulate environmentally-friendly and economical feed

Least cost feed formulation is not designed to identify feed compositions that meet today's environmental expectations. This study aimed at developing a new feed formulation methodology using multiobjective optimization. It involves the use of an economic indicator (feed price) and environmental indicators (LCA impacts) simultaneously in a single objective function to minimize. A weighting coefficient allows more or less influence of economic or environmental indicators. The best trade-off is obtained for an optimal weighting coefficient set to be the coefficient beyond which the marginal increase of price exceeds the marginal decrease of environmental indicators. Using this method in a scenario where feed ingredients availability is not restrictive, a significant decrease by 9 %, 23 %, 19 % and 16 % of environmental impacts of broiler feed for "phosphorus consumption", "use of non-renewable energy", "climate change" and "acidification" respectively, can be expected. "Land occupation" is unchanged while "eutrophication" tends to decrease. This is obtained with a little feed price increase (2 %). Eco-feeds are characterized by an increase in by-products' content. Thus, multiobjective formulation is efficient to possibly reduce potential environmental impacts of animal feed without pollutions transfer.

INTRODUCTION

En productions d'animaux monogastriques, l'alimentation constitue le premier levier de réduction des impacts environnementaux liés aux activités d'élevage. En effet, ces impacts sont en majorité expliqués par l'alimentation des animaux d'élevage (en poulet de chair, l'alimentation contribue pour plus de 72 % au changement climatique par exemple (Prudêncio da Silva *et al.*, 2014)). Cela résulte principalement des impacts de la production et du transport des matières premières (MP). En conséquence, deux solutions de réduction des impacts environnementaux de l'élevage se présentent :

- 1) Améliorer l'efficacité de conversion de l'aliment par les animaux pour réduire simultanément l'ensemble des impacts environnementaux ainsi que le coût de production à l'échelle du produit. Néanmoins, les progrès de la génétique offrent aujourd'hui une marge de manœuvre restreinte ;
- 2) Modifier la composition des aliments en privilégiant les MP présentant des impacts environnementaux plus faibles, le risque étant alors d'observer des transferts de pollution entre impacts environnementaux et/ou d'augmenter le prix de l'aliment.

L'étude présentée ci-après avait pour objectif de développer une méthode de formulation multiobjectif (**MinMO**) prenant simultanément en compte le prix de l'aliment ainsi que ses impacts environnementaux calculés par analyse de cycle de vie (**ACV**). La méthode développée permet d'explorer les différents compromis possibles et de formuler des « éco-aliments » optimaux dont les impacts environnementaux sont réduits conjointement et pour un surcoût limité.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Caractérisation des matières premières

Les MP sont caractérisées par leur composition nutritionnelle, leur prix et leurs impacts environnementaux potentiels.

Les compositions nutritionnelles sont issues des tables INRA-AFZ (Sauvant *et al.*, 2004) et de FeedBase.com et complétées par les instituts techniques partenaires dans le cas des coproduits de céréales. Les prix ont été collectés dans La Dépêche Commerciale et auprès des partenaires du projet pour des contextes économiques diversifiés. Enfin, les impacts environnementaux proviennent du jeu de données ECOALIM de la base AGRIBALYSE[®] v1.3. (Wilfart *et al.*, 2017). Il s'agit d'impacts calculés par ACV avec une méthode homogène pour la consommation de phosphore non renouvelable (**P**, en kg P / kg MP), l'utilisation d'énergie non-renouvelable (**EN**, en MJ / kg MP), le changement climatique (**CC**, en kg de CO₂eq / kg MP), l'acidification (**AC**, en mol H⁺eq / kg MP) et l'eutrophisation (**EU**, en kg PO₄³⁻eq / kg MP) des écosystèmes ainsi que l'occupation des terres (**OT**, en

m².an / kg MP). Les impacts du transport des MP depuis leur lieu de stockage/transformation jusqu'à une usine de fabrication d'aliments fictive située dans le Grand Ouest ont été ajoutés (données Ecoinvent v3.1, Wernet *et al.*, 2016).

1.2. La formulation : description du problème

Une formule correspond à un mélange de MP en différentes proportions de façon à satisfaire les besoins nutritionnels de l'animal pour un objectif de production donné. Formuler consiste donc à déterminer les MP à utiliser et leurs proportions dans le mélange. Cela revient à résoudre un problème linéaire qui admet généralement une infinité de solutions.

Traduit en termes mathématiques, le problème s'écrit ainsi :

Soient $i \in \{1, \dots, n\}$ l'index de la $i^{\text{ème}}$ MP parmi n MP disponibles et $x_i \in [0 ; 1]$ la quantité, exprimée en pourcentage, de la MP i dans la formule. Alors,

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

Si on considère c_i le prix de la MP i , le prix de la formule est obtenu comme suit :

$$\text{Prix} = \sum_{i=1}^n x_i c_i$$

De plus, les besoins nutritionnels se traduisent en contraintes de formulation, c'est-à-dire des teneurs minimum B_j^{\min} et maximum B_j^{\max} pour chaque nutriment. En notant $j \in \{1, \dots, p\}$ l'index du $j^{\text{ème}}$ nutriment et $a_{j,i}$ la teneur du nutriment j dans la MP i , la formule doit alors vérifier :

$$B_j^{\min} \leq \sum_{i=1}^n x_i a_{j,i} \leq B_j^{\max}$$

Par ailleurs, des contraintes d'incorporation existent également sur les MP pour des raisons techniques, technologiques ou pour répondre aux cahiers des charges. De la même façon que précédemment, il faut vérifier :

$$X_i^{\min} \leq x_i \leq X_i^{\max}$$

avec X_i^{\min} et X_i^{\max} les incorporations minimale et maximale de la MP i . Les contraintes pour les nutriments et pour les MP ont été définies après consultation de professionnels de l'alimentation animale.

En pratique, la solution retenue est celle qui minimise le prix de la formule. Le prix sert alors de fonction objectif (**FO**) dont est cherché ici le minimum.

Face aux attentes sociétales de plus en plus pressantes, notamment vis-à-vis des impacts environnementaux liés aux activités d'élevage, la formulation à moindre coût (**MinPrix**) s'avère inefficace pour réduire les impacts environnementaux attribués à l'alimentation animale. La méthode proposée ici devait répondre aux conditions suivantes :

- Une méthode simple d'appropriation, proche de la formulation classique à moindre coût ;
- Une méthode qui évite les transferts de pollutions entre impacts environnementaux ;
- Une méthode qui limite l'augmentation du prix de la formule.

Pour cela, 2 modifications ont été apportées :

1) La FO est définie comme une combinaison linéaire du prix et de 4 impacts environnementaux pour lesquels les résultats à l'échelle du produit reposent largement sur la contribution de l'alimentation, soient P, EN, CC et OT.

2) Des contraintes maximales ont été fixées par sécurité de façon à limiter l'augmentation des impacts environnementaux à + 5 % (par rapport aux impacts d'une formule MinPrix) pour les 7 impacts considérés à savoir P, EN, CC, AC, EU et OT.

La FO est ainsi composée d'un index économique noté *index éco* pondéré par un coefficient $1-\alpha$ et d'un index environnemental noté *index env* pondéré par un coefficient α ($\alpha \in [0;1]$) :

$$\text{index éco} = \frac{\text{Prix}}{\text{Prix}_{ref}}$$

$$\text{index env} = \left(\frac{2}{5} \times \frac{CC}{CC_{ref}} + \frac{1}{5} \times \frac{OT}{OT_{ref}} + \frac{1}{5} \times \frac{P}{P_{ref}} + \frac{1}{5} \times \frac{EN}{EN_{ref}} \right)$$

Chaque critère est exprimé de façon relative par rapport à sa valeur de référence obtenue pour l'aliment MinPrix dans le même contexte (prix des MP et localisation de l'usine). Cela permet de sommer des données de même unité et de même ordre de grandeur, évitant notamment de déséquilibrer l'optimisation en faveur des critères exprimés avec des valeurs élevées à la tonne d'aliment.

Finalement le problème de formulation MinMO s'écrit ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min[(1-\alpha) \times \text{index éco} + \alpha \times \text{index env}] \\ \sum_{i=1}^n x_i = 1 \\ B_i^{\min} \leq \sum_{i=1}^n x_i a_{j,i} \leq B_i^{\max} \\ X_i^{\min} \leq x_i \leq X_i^{\max} \\ \sum_{i=1}^n x_i P_i \leq P_{ref}(1+5\%) \\ \sum_{i=1}^n x_i EN_i \leq EN_{ref}(1+5\%) \\ \sum_{i=1}^n x_i CC_i \leq CC_{ref}(1+5\%) \\ \sum_{i=1}^n x_i AC_i \leq AC_{ref}(1+5\%) \\ \sum_{i=1}^n x_i EU_i \leq EU_{ref}(1+5\%) \\ \sum_{i=1}^n x_i OT_i \leq OT_{ref}(1+5\%) \end{array} \right.$$

La résolution d'un tel problème linéaire, c'est-à-dire l'identification des x_i pour $i \in \{1, \dots, n\}$, a été réalisée à l'aide de l'OpenSolver pour Excel®.

1.3. Identifier l'éco-aliment optimal

Lorsque $\alpha=0$, la FO se résume à l'*index éco*. Cela revient à formuler à moindre coût. Lorsque $\alpha=1$, la FO est égale à l'*index env*. Pour α entre 0 et 1, il est possible d'explorer un grand nombre de compromis donnant plus ou moins d'importance à chacun des index.

L'éco-aliment optimal a été défini comme l'aliment obtenu pour $\alpha=\alpha_{opt}$ au-delà duquel l'augmentation marginale de l'*index éco* est supérieure à la réduction marginale de l'*index env*. Une macro Excel® permet d'identifier de façon automatisée le α_{opt} à 0,01 près.

1.4. Utilisation de la méthode MinMO dans différents scénarios

La méthode MinMO a été utilisée pour formuler successivement les aliments démarrage (**D**), croissance (**C**) et finition (**F**) pour le poulet de chair. Un aliment moyen a ensuite été calculé comme la somme pondérée des 3 aliments de façon à tenir compte de leur consommation au cours de la vie du poulet : 6 % C + 20 % C + 74 % F.

Dans le but de valider l'efficacité et l'intérêt de la méthode MinMO dans différents contextes, les formules ont été optimisées pour 4 contextes économiques contrastés (septembre 2011, juin 2012, août 2013 et février 2014).

Enfin, deux scénarios d'approvisionnement en MP ont été envisagés. Un scénario dit limitant (**LIM**) utilisant une liste de MP restreinte aux MP couramment utilisées en alimentation des poulets de chair et un scénario prospectif dit non limitant (**NLIM**) élargissant le panier de MP à des MP actuellement peu disponibles (sorgho, pois et féverole) de sorte d'évaluer l'intérêt de l'utilisation de ces MP dans la formulation d'éco-aliments.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Utilisation de la méthode MinMO, effets sur la composition de l'aliment

Quel que soit le contexte économique ou le scénario de disponibilité des MP, l'utilisation de la méthode MinMO se traduit par une augmentation de la part des coproduits (coproduits de céréales, tourteaux de colza et de tournesol) dans les formules (+9 % en moyenne pour $\alpha=\alpha_{opt}$). Par ailleurs, les formules obtenues par formulation MinMO avec $\alpha=\alpha_{opt}$ contiennent moins de céréales (-8 % en moyenne). Celles-ci étant remplacées par des oléo-protéagineux (+6 % en moyenne) et de l'huile de colza (+2 % en moyenne) (Figure 1).

Si la méthode MinMO semble conduire à une diversification des formules (augmentation du nombre d'espèces végétales utilisées), l'effet des scénarios LIM vs NLIM reste le facteur principal.

Dans le cadre du scénario LIM, le maïs est substitué par du blé tandis que le tourteau de soja est remplacé par des tourteaux de colza et de tournesol ainsi que des graines de colza. De la même façon, l'huile de soja laisse place à l'huile de colza.

Dans le cadre du scénario NLIM, le sorgho remplace en grande partie le maïs dans les formules MinPrix. Il est à son tour remplacé par du blé dans les formules MinMO. L'incorporation de pois ou de féverole selon les contextes économiques, participe à réduire l'utilisation de tourteau de soja.

2.2 Utilisation de la méthode MinMO, effets sur le prix et les impacts environnementaux de l'aliment

Dans le cas du contexte LIM, la formulation MinMO avec $\alpha = \alpha_{opt}$ permet d'améliorer de façon significative les impacts potentiels P, EN et CC en moyenne de respectivement -12 %, -18 % et -12 %. De plus, AC et EU tendent à être réduits également sans augmentation significative d'OT. Les impacts environnementaux de l'éco-aliment ainsi obtenu sont donc bien améliorés par rapport à l'aliment de référence pour un surcoût de 3,4 % en moyenne (moins de 10 €/t) (Figure 2).

L'élargissement du panier de MP (contexte NLIM) permet une amélioration « spontanée » (en formulation MinPrix) du prix de l'aliment et de certains impacts environnementaux comme EN, CC et AC par rapport à l'aliment MinPrix_LIM. L'utilisation de la méthode MinMO avec $\alpha = \alpha_{opt}$ dans ce contexte NLIM conduit alors à une amélioration supplémentaire de l'index environnemental. Pour une moindre augmentation du prix (+2,3 % en moyenne, soit moins de 7 €/t), des améliorations moyennes respectives de -9 %, -23 %, -19 % et -16 % pour P, EN, CC et AC peuvent être attendues (Figure 2).

2.3. Discussion

Avant tout, les résultats obtenus démontrent l'efficacité de la méthode MinMO pour répondre aux objectifs visés, à savoir réduire les impacts environnementaux de l'alimentation en évitant les transferts de pollutions entre impacts et en limitant le surcoût (du même ordre de grandeur que les variations mensuelles du prix), et ce dans différents contextes économiques et pour différents scénarios de disponibilité des MP.

Néanmoins, il est évident que les résultats, en termes de composition des formules comme en termes d'amélioration des impacts, dépendent des hypothèses utilisées. Ainsi, l'intérêt d'incorporer des coproduits

dans les éco-aliments est inhérent au choix de la méthodologie d'allocation économique dans l'estimation des impacts environnementaux des MP (Wilfart *et al.*, 2017). De même, l'hypothèse d'utiliser les mêmes prix pour les scénarios LIM et NLIM conditionne les résultats obtenus pour le scénario prospectif NLIM. L'augmentation de la demande pour des MP présentant de faibles impacts étant susceptible d'entraîner des modifications de prix et par conséquent la composition des formules, leur prix et leurs impacts environnementaux.

Par ailleurs, la faisabilité et l'appropriation de la méthode MinMO conditionnent son utilisation pour réduire les impacts environnementaux de l'alimentation animale. Si l'importante similarité de la méthode MinMO par rapport à la méthode MinPrix doit faciliter son appropriation, le frein restera l'existence d'un surcoût à répartir entre acteurs des filières ou à répercuter sur le prix de vente du produit. De plus, les travaux menés en porcs (Garcia-Launay *et al.*, 2016) montrent un intérêt pour les mêmes MP et posent les questions de 1) la disponibilité des MP, 2) la concurrence/coopération entre filières animales et 3) la concurrence/coopération entre acteurs à l'échelle du territoire pour l'utilisation des ressources disponibles au plus intéressant pour la communauté.

CONCLUSION

La méthode de formulation multiobjectif, en optimisant la formule alimentaire sur la base de critères économique (prix) et environnementaux (impacts ACV), s'avère être une méthode originale, simple et efficace pour réduire les impacts environnementaux de l'aliment du poulet de chair tout en maîtrisant le surcoût. Compte tenu de la contribution du poste alimentation dans le coût de production du poulet et les impacts environnementaux à l'échelle du produit, la méthode développée ici apparaît comme un outil intéressant pour améliorer la durabilité des filières (Méda *et al.*, 2017).

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'UMT Biologie Intégrative Recherche et Développement (BIRD) et a bénéficié du soutien financier du CAS DAR et de l'ADEME (projet ECOALIM 2013-2016). Les auteurs remercient les professionnels pour leurs conseils lors de la construction des contraintes de formulation et la contribution d'Yves Dronne, consultant auprès de Feedsim Avenir au développement de la fonction multiobjectif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Garcia-Launay F., Wilfart A., Dusart L., Nzally C., Gaudré D., Dronne Y., S., Espagnol S., 2016. ^{10èmes} LCAFood, 539-546.
 Méda B., Dusart L., Ponchant P., Garcia-Launay F., Espagnol S., Wilfart A., Bouvarel I., 2017. ^{12èmes} JRA-JRFG.

Prudêncio da Silva V.P., van der Werf H.M.G., Soares S.R, Corson M.S., 2014. J. Environ. Manage., (133), 222-231.
 Sauvart D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables INRA-AFZ de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : 2ème édition (INRA Editions Versailles), pp306.
 Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E., Weidema B., 2016. J. Life Cycle Assess., (21), 1218-1230.
 Wilfart A., Dauguet S., Tailleur A., Willmann S., Laustriat M., Magnin M., Garcia-Launay F., Gac A., Dusart L., Espagnol S., 2017. ^{12èmes} JRA-JRFG.

Figure 1. Composition (en %) de l'aliment moyen formulé à moindre coût (MinPrix) ou avec la méthode d'optimisation multiobjectif (MinMO) pour $\alpha = \alpha_{opt}$. Moyenne des résultats obtenus pour les scénarios LIM et NLIM dans les différents contextes économiques

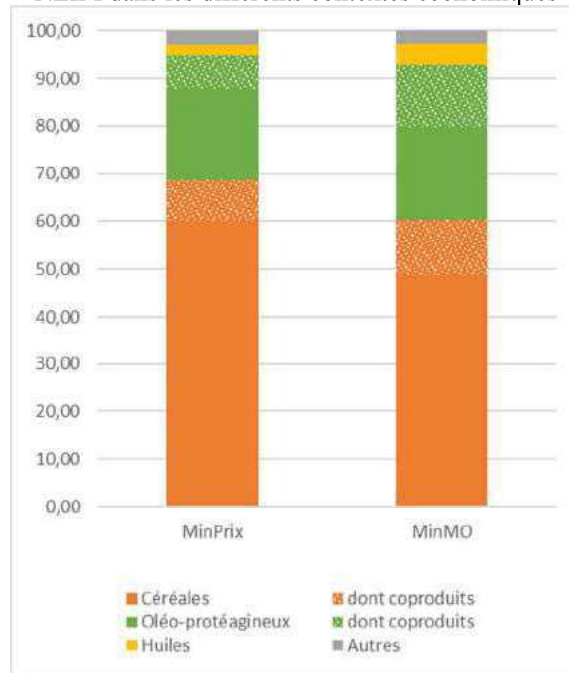


Figure 2. Effets de la formulation multiobjectif (MinMO) (avec $\alpha = \alpha_{opt}$) et/ou du scénario de disponibilité des MP sur le prix et les impacts environnementaux de l'aliment moyen, exprimés en relatif par rapport à un aliment formulé à moindre coût (MinPrix) dans le scénario LIM. Moyenne des résultats obtenus pour les différents contextes économiques. Les barres d'erreur figurent les minimums et maximums observés. P : consommation de phosphore ; EN : utilisation d'énergie non renouvelable ; CC : changement climatique ; AC : acidification ; EU : eutrophisation ; OT : occupation des terres

