



Formuler l'aliment autrement

*Intérêt de la formulation multiobjectif
pour réduire les impacts environnementaux
de la production de poulets de chair*

Résumé

Réduire l'impact environnemental des élevages passe tout d'abord par la réduction des impacts environnementaux de l'aliment des animaux d'élevage, premier contributeur du changement climatique pour la production de poulet par exemple. Dans ce contexte, le projet ECOALIM s'est fixé comme objectif de proposer des références, des méthodes et des outils pour explorer des stratégies d'alimentation répondant à des contraintes économiques et environnementales et ce pour différentes productions animales : poulets de chair, porcs, bovins laitiers et bovins allaitants. Dans un premier temps, une **base de données des impacts environnementaux calculés par analyse de cycle de vie (ACV)** pour les matières premières utilisées en alimentation animale a été produite et diffusée. Dans un second temps, un travail méthodologique sur la formulation a conduit au **développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif** permettant l'identification d'éco-aliments plus respectueux de l'environnement. Ce travail a notamment permis de démontrer l'intérêt de la formulation multiobjectif pour éviter les transferts de pollutions.

Contexte

La méthode présentée ici a été développée dans le cadre du projet ECOALIM, labélisé RMT élevage et environnement. Ce projet a reçu le soutien financier du CASDAR et de l'ADEME. Il s'agit d'une étude multi-espèce regroupant les différents instituts techniques animaux (ITAVI, IFIP, IDELE), végétaux (ARVALIS, Terres INOVIA), l'INRA et FeedSim Avenir.

Les travaux concernant le poulet de chair ont été menés dans le cadre de l'UMT Bird associant l'INRA et l'ITAVI.

1. Introduction

Après une période de rationalisation de la production agricole pour répondre à la demande alimentaire et parallèlement à l'urbanisation, la croissance économique et l'augmentation du pouvoir d'achat, les relations entre élevage et société se sont complexifiées. En effet, **la société attend aujourd'hui de l'élevage davantage que sa seule fonction nourricière**. L'élevage doit ainsi prendre en compte la diversité des enjeux économiques, sociaux et environnementaux (Ellies, 2014 et Guillaumin *et al.*, 2008).

De nombreux travaux ont estimé **les impacts environnementaux de l'activité d'élevage** en utilisant entre autres **l'analyse de cycle de vie (ACV)** et mettant en évidence la contribution importante de l'alimentation animale à ces derniers. Par exemple, 50 % à 85 % de l'impact changement climatique lié à la production de

poulet de chair sont estimés imputables à la production des matières premières pour son alimentation (Pelletier, 2008, Nguyen *et al.*, 2012, da Silva *et al.*, 2014).

Dans un premier temps, l'identification des principaux facteurs explicatifs des impacts environnementaux liés à l'aliment (déforestation, transport maritime...) permet de proposer des scénarios plus respectueux de l'environnement (ex : approvisionnement en soja issu de terres non déforestées ; Tongpool *et al.*, 2012). Néanmoins, les solutions explorées nécessitent d'être optimisées afin de maîtriser les effets sur le prix et les différents impacts environnementaux de l'aliment.

Plusieurs travaux se sont alors intéressés à la formulation pour **développer des méthodes de formulation d'aliments** avec un impact environnemental réduit (Tableau 1). La plupart se limite à ne considérer qu'1 ou 2 impacts environnementaux en plus du prix et ne proposent donc pas de solution efficace face au problème de transfert de pollution. De plus, les méthodes proposées (minimisation du prix sous contraintes environnementales ou inversement) ne permettent en général pas d'aboutir à un compromis satisfaisant entre prix et environnement.

Dans ce contexte, le projet ECOALIM, s'est fixé comme objectif de proposer des références, des méthodes et des outils pour **explorer des stratégies d'alimentation** (formulation et distribution) au regard de **contraintes économiques et environnementales** et pour les différentes productions animales : poulets de chair, porcs,

Tableau 1 : Méthodes de formulation existantes prenant en compte des critères environnementaux

CC : changement climatique ; EU : eutrophisation potentielle ; N : azote ; P : phosphore ; EN : consommation d'énergie non renouvelable ; AC : acidification potentielle

| Méthode | Commentaires | Source |
|--|--|---|
| Minimisation du coût sous contraintes environnementales (CC et EU) | Pas d'optimisation du compromis | Nguyen <i>et al.</i> , 2012 |
| Minimisation d'une fonction composite du coût et des rejets de N et P | Nécessite de définir un coût associé aux rejets | Oishi <i>et al.</i> , 2011 |
| Minimisation de la déviation par rapport à un objectif de compromis prix, impacts environnementaux | Nécessite de se fixer un objectif Permet d'explorer plusieurs solutions | Moraes <i>et al.</i> , 2015 |
| Minimisation d'une fonction composite du coût et de la teneur en P total et/ou de la teneur en N | Permet d'explorer plusieurs pondérations entre prix, P et/ou N | Pomar <i>et al.</i> , 2007 Dubeau <i>et al.</i> , 2011 |
| Minimisation d'une fonction composite du coût et des rejets de P et/ou N | Permet d'explorer plusieurs pondérations entre prix, P et/ou N | Dubeau <i>et al.</i> |
| Optimisation successive des critères individuellement sous contraintes des critères restants | Méthode itérative pas à pas Nécessite de fixer des objectifs sur les critères | Castrodeza <i>et al.</i> , 2005 Lara, 1993 |
| Minimisation d'une fonction composite CC + EN + EU + AC | Optimisation à l'échelle de l'atelier d'élevage La fonction objectif n'inclue pas le prix | Mackenzie <i>et al.</i> , 2016 |

bovins laitiers et bovins allaitants. Une **nouvelle méthode de formulation** a ainsi été développée. A la fois **simple** car elle utilise le principe de programmation linéaire et **originale** car elle considère simultanément le critère prix et plusieurs impacts environnementaux comme objectifs à optimiser (multiobjectif). Enfin, elle est **souple** et permet d'explorer un ensemble de solutions parmi lesquelles chaque opérateur peut choisir le compromis qui répond à ses attentes.

Cet article présente la méthode, illustrée avec les résultats obtenus pour le poulet de chair.

2. Matériel et méthode

Afin de remplir l'objectif annoncé, les étapes suivantes ont permis d'identifier et d'évaluer différentes stratégies alimentaires pour réduire l'impact environnemental de l'élevage en étudiant la génération des impacts aux différentes échelles successives : les matières premières, l'aliment, l'atelier d'élevage, le produit final.

Etape 1 : établir une **base de données des impacts environnementaux** calculés par ACV pour les matières premières de l'alimentation animale.

Etape 2 : développer une **méthode de formulation intégrant des contraintes environnementales** en plus des contraintes économiques et nutritionnelles classiques.

Etape 3 : **identifier des « éco-aliments »** plus respectueux de l'environnement.

Etape 4 : évaluer la pertinence de ces éco-aliments à l'échelle de l'élevage et du produit.

Etape 5 : identifier et évaluer des **stratégies alimentaires** (formulation et distribution) améliorant les impacts environnementaux des productions animales.

2.1. La base de données ECOALIM

La première étape du projet ECOALIM a permis de produire une **base de données des impacts environnementaux calculés par ACV pour les matières premières utilisées en alimentation des animaux d'élevage** en France (Dauguet *et al.*, 2015 ; Wilfart *et al.*, 2015 a ; Wilfart *et al.*, 2015 b).

Cette base de données a été établie de façon à être la plus **exhaustive** possible compte tenu des données disponibles et afin de rendre compte de la diversité des matières premières utilisées en alimentation animale en France, d'origines variées, produites selon différents itinéraires techniques et/ou ayant subi divers procédés de transformation.

Aujourd'hui disponible gratuitement à l'adresse suivante : http://rmtelevagesenvironnement.org/bd_ECOALIM.htm, la base de données ECOALIM permet de disposer des impacts environnementaux de 153 matières premières calculés avec une **methodologie homogène**. Les ACV ont été conduites pour 6 indicateurs d'impacts : **consommation d'énergie (EN)**, **changement climatique (CC)**, **consommation de phosphore (P)**, **acidification (AC)**, **eutrophisation (EU)** et **occupation des terres (OT)**. L'ensemble des données produites a été vérifié et validé par un comité d'experts.

Cette base de données permet donc de disposer de références fiables et cohérentes (même méthodologie) pour évaluer les impacts environnementaux des aliments et des productions animales.

Principe de l'analyse de cycle de vie (ISO, 1997)

Selon la norme ISO 14040 (1997), l'ACV est une **méthode d'évaluation des impacts environnementaux potentiels associés à un produit**. Les impacts potentiels du produit sont étudiés tout au long de son cycle « du berceau à la tombe » en prenant en compte l'ensemble des processus élémentaires conduisant à sa production et à sa destruction (utilisation de matières premières, fabrication, utilisation, destruction). Un cadre méthodologique pour la réalisation d'ACV a été formalisé et comprend quatre étapes :

- Définition des objectifs et du périmètre du système étudié
- Analyse de l'inventaire = agrégation des émissions et consommations recensés pour chaque processus élémentaire
- Evaluation des impacts = traduction de l'inventaire en indicateurs environnementaux
- Interprétation

Les impacts environnementaux potentiels considérés dans ECOALIM peuvent être distingués :

- Les **impacts globaux** ayant des implications à l'échelle mondiale (CC, EN, P)
- Les **impacts locaux** ayant des implications à l'échelle régionale (EU, AC, OT)

2.2. La formulation « environnementale »

Réduire l'impact environnemental des élevages passe avant tout par la réduction de l'impact environnemental des intrants alimentaires. Aussi, dans le cadre d'ECOALIM, **plusieurs méthodes de formulation intégrant des critères environnementaux**, en plus des critères économiques et nutritionnels classiques, ont été testées. La formulation a été réalisée sur Excel® à l'aide de l'Open Solver.

2.2.1. Contextes économiques

Avec la forte variabilité des prix des matières premières, la formule d'un aliment dépend largement du contexte économique. Aussi, pour vérifier la robustesse des conclusions de cette étude, les calculs ont été menés pour **4 contextes économiques** choisis pour refléter la diversité des situations (Tableau 2).

Les prix ont été relevés dans *La Dépêche* ou, si indisponibles, communiqués par des fournisseurs.

Juin 2012 est fixé comme le scénario témoin dans la mesure où prix et ratios de prix sont proches de la situation moyenne entre 2011 et 2014.

Tableau 2 : Description des contextes économiques retenus pour l'étude ainsi que le contexte moyen sur la période considérée 2011-2014

| | | Septembre 2011 | Juin 2012 | Août 2013 | Février 2014 | Moyenne 2011-2014 |
|---------------|---|-------------------|--------------|--------------|-----------------|----------------------|
| Prix (€/t) | blé | 187 | 203 | 170 | 177 | 199 |
| | maïs | 190 | 199 | 181 | 162 | 199 |
| | tourteau de soja | 318 | 431 | 454 | 486 | 404 |
| Ratios | maïs / blé | 1,18 | 1,00 | 1,14 | 0,92 | 1,01 |
| | tourteau de soja / blé | 1,55 | 1,88 | 2,39 | 2,39 | 1,87 |
| | tourteau de colza / tourteau de soja | 0,68 | 0,69 | 0,58 | 0,62 | 0,66 |
| | tourteau de tournesol / tourteau de soja | 0,51 | 0,51 | 0,54 | 0,41 | 0,50 |

2.2.2. Scénarios d'approvisionnement

Afin d'étudier la part du transport dans le bilan environnemental et l'éventuel effet des schémas d'approvisionnement sur la composition des aliments, **5 scénarios d'approvisionnement** ont été établis. Ces

scénarios ont été définis afin de refléter diverses situations régionales contrastées, caractérisées par des coûts d'approches (transport) variables selon la distance entre l'usine de fabrication d'aliment et les matières premières (Tableau 3).

Enfin, les scénarios d'approvisionnement sont également caractérisés par une **liste de matières premières disponibles**. Deux listes ont été définies pour le poulet de chair : une liste dite en disponibilité limitée (LIM) et une liste dite en disponibilité illimitée (NLIM). La première contient les matières premières classiquement utilisées en alimentation des poulets de chair et permettant de formuler des aliments proches des pratiques. La seconde contient, en plus des matières premières de la première liste, le sorgho, le pois et la féverole, moins disponibles actuellement mais potentiellement intéressants.

2.2.3. Principe de la formulation à moindre coût

En pratique, la **formulation d'aliment fait intervenir des contraintes nutritionnelles et économiques**. Il s'agit d'optimiser, par résolution d'un problème linéaire, la composition d'un aliment de sorte qu'il réponde aux besoins des animaux pour le plus faible coût possible.

La fonction objectif est une fonction mathématique composée de variables de sortie qui caractérisent le système étudié. L'objectif est alors de

minimiser ou de maximiser la valeur prise par la fonction objectif éventuellement soumise à un jeu de contraintes. Dans le cas de la formulation d'aliment à moindre coût, la **fonction objectif à minimiser est égale au prix de l'aliment**. Les contraintes sont d'ordre nutritionnel ou

Tableau 3 : Description des scénarios d'approvisionnement

Légende : 100 km route 300 km route 500 km route 500 km train

| | Scénario local | Scénario Grand Ouest | Scénario Sud | Scénario éloigné route | Scénario éloigné train |
|--|----------------|----------------------|--------------|------------------------|------------------------|
| Céréales | | | | | |
| Coproduits de céréales | | | | | |
| Graines protéagineuses et oléagineuses | | | | | |
| Tourteaux d'oléagineux | | | | | |
| Corps gras | | | | | |
| Minéraux, additifs | | | | | |

technologique, voire liées à la disponibilité des matières premières ou l'existence d'un cahier des charges.

2.2.4. Formulation environnementale : le principe

- La formulation environnementale mono-objectif

Une méthode de formulation environnementale peut consister à redéfinir la fonction objectif « traditionnelle » en cherchant à **minimiser un impact environnemental** plutôt que le prix de l'aliment. Cela permet notamment de mettre en évidence le potentiel de réduction d'un impact ACV d'un aliment dans un contexte de formulation donné. Une contrainte peut éventuellement être ajoutée afin de limiter l'augmentation du prix.

- La formulation environnementale multiobjectif

La méthode proposée ici doit permettre de tenir compte de critères environnementaux dans la formulation de l'aliment. Il s'agit, non pas de se fixer des contraintes environnementales comme il existe des contraintes nutritionnelles, mais bien d'**introduire des variables environnementales dans la fonction objectif** afin d'optimiser la composition de l'aliment selon des considérations environnementales. Le critère économique du prix étant incontournable dans le contexte d'une activité commerciale, et compte tenu du risque d'obtenir des effets indésirables lors d'une formulation n'utilisant qu'un critère

environnemental, le choix a été fait de construire une fonction multiobjectif.

Sont retenus comme critères dans la fonction multiobjectif, le prix et les **impacts environnementaux globaux** pour lesquels la contribution de l'aliment dans le bilan environnemental de l'élevage est importante (> 50%) :

- Prix
- Changement climatique (CC)
- Occupation des terres (OT)
- Consommation de phosphore (P)
- Consommation d'énergie non renouvelable (EN)

La valeur de référence du critère « prix » est définie comme le prix de l'aliment formulé à moindre coût pour le contexte économique et le scénario d'approvisionnement étudiés.

La valeur de référence d'un indicateur environnemental est définie comme la moyenne des valeurs de cet indicateur obtenues lors de la formulation à moindre coût pour les 4 contextes économiques dans le cas du scénario d'approvisionnement étudié.

La fonction multiobjectif s'écrit alors :

$$(1 - \alpha) \times \frac{\text{Prix}}{\text{Prix}_{\text{ref}}} + \alpha \times \left(\frac{2}{5} \times \frac{\text{CC}}{\text{CC}_{\text{ref}}} + \frac{1}{5} \times \frac{\text{OT}}{\text{OT}_{\text{ref}}} + \frac{1}{5} \times \frac{\text{P}}{\text{P}_{\text{ref}}} + \frac{1}{5} \times \frac{\text{EN}}{\text{EN}_{\text{ref}}} \right)$$

Avec $\alpha \in [0;1]$

De plus, des contraintes maximales sont fixées à +5% d'augmentation pour l'ensemble des critères environnementaux (EN, CC, P, AC, EU et OT) pour limiter la dégradation des impacts acidification, eutrophisation notamment (non inclus dans la fonction multiobjectif).

Les impacts environnementaux retenus dans la fonction multiobjectif étant des impacts globaux, il n'est pas justifié de donner plus d'importance à l'un d'entre eux quel que soit le territoire considéré. Une exception a cependant été faite dans le cas particulier du critère CC : en effet, les attentes relatives à la réduction du changement climatique

La fonction multiobjectif consiste en une combinaison linéaire des critères à optimiser. Les coefficients traduisent l'importance relative accordée par le formulateur aux différents critères. La principale difficulté dans l'élaboration d'une fonction multiobjectif est d'agrégier des critères qui n'ont pas la même unité ni le même ordre de grandeur. **Des ratios par rapport à des valeurs de référence** sont donc construits et la fonction multiobjectif s'écrit alors :

$$\lambda_1 \times \frac{f_1}{f_{1\text{ref}}} + \lambda_2 \times \frac{f_2}{f_{2\text{ref}}} + \lambda_3 \times \frac{f_3}{f_{3\text{ref}}} + \dots + \lambda_p \times \frac{f_p}{f_{p\text{ref}}}$$

Avec $\sum_{i=1}^p \lambda_i = 1$

Où f_i est la valeur de l'indicateur i pour l'aliment formulé, $f_{i\text{ref}}$ est la valeur de référence pour l'indicateur i et λ_i est le coefficient pondérateur de $\frac{f_i}{f_{i\text{ref}}}$.

étant importantes, le facteur de pondération est multiplié par 2 pour ce critère.

Différentes pondérations entre le prix d'une part et les impacts environnementaux d'autre part sont explorées, en faisant varier la valeur du coefficient α entre 0 et 1. Cela permet d'envisager un ensemble de solutions correspondant à différents niveaux de compromis entre prix et impacts environnementaux. **En effet, lorsque $\alpha=0$, cela revient à chercher une formule minimisant le prix de l'aliment, tandis que lorsque $\alpha=1$, la fonction objectif ne tient plus compte que des critères environnementaux pour optimiser la formule.**

2.2.5. Eco-aliments

Un éco-aliment a été défini comme un aliment pour lequel les critères CC, OT, P et EN sont réduits d'au moins 10 % par rapport aux valeurs de référence, les autres critères environnementaux n'augmentant pas de plus de 5 % et l'augmentation de prix par rapport à l'aliment formulé à moindre coût étant la plus faible possible. Le seuil de 10 % a été choisi de façon à garantir une modification significative de l'impact de l'aliment, compte tenu de l'incertitude sur les données ACV.

2.3. Evaluation des stratégies à l'échelle de l'élevage

Une évaluation des impacts environnementaux par ACV a ensuite été conduite à l'échelle de l'atelier d'élevage, prenant en compte l'impact des poussins, des bâtiments d'élevage, des outils et équipements, de l'alimentation, de la litière, de l'activité d'élevage (ventilation, chauffage...). L'objectif était de valider la pertinence des éco-aliments dans la réduction de l'impact global de l'élevage.

Les calculs ont été menés sur le cas type « poulet standard en Pays-de-la-Loire » caractérisé par des données moyennes des élevages de poulets standard de la région Pays-de-la-Loire (Tableau 4) issues d'extraction des enquêtes avicoles des Chambres d'Agriculture, des références ITAVI (ITAVI, 2008) et d'enquêtes auprès de la filière (Protino et al., 2015). Les implications économiques sur les coûts de production du vif et du filet ont également été estimées grâce à l'utilisation d'un calculateur de coût de production (Dusart et al., 2016).

Tableau 5 : Caractéristiques nutritionnelles de l'aliment concentré en acides aminés et effets sur les performances zootechniques

| Variables | Modification |
|---|--------------|
| Apport en énergie métabolisable (kcal/kg) | - 50 |
| Teneur en lysine (%) | + 0,15 |
| Teneurs en acides aminés | équilibrées |
| IC (kg/kg) | - 0,08 |
| Age d'abattage (j) | - 2 |
| Rendement filet (%) | + 0,4 |

Tableau 4 : Caractéristiques technico-économiques du cas type poulet standard en région Pays-de-la-Loire

| Standard Pays-de-la-Loire | |
|---|--------------------|
| Caractéristiques et performances des animaux | |
| Souche | Ross PM3 |
| Poids au démarrage (kg) | 0,04 |
| Poids à l'abattage (kg) | 1,83 |
| Durée d'élevage (j) | 36 |
| Rendement filet (%) | 18,3 |
| Indice de Consommation | 1,73 |
| Ratio Eau/Aliment | 1,80 |
| Mortalité (%) | 4,19 |
| Saisies (%) | 0,92 |
| Caractéristiques des bâtiments/parcours | |
| Densité au démarrage (animaux/m²) | 23,4 |
| Surface du bâtiment (m²) | 1300 |
| Nombre de lots par an | 6,6 |
| Type de bâtiment/ventilation | Colorado Dynamique |
| Type de chauffage | Radiants propane |
| Brumisation | oui |
| Type de litière | Paille broyée |
| Quantité de litière (kg/m²) | 4,5 |
| Consommations d'énergie et d'eau | |
| Electricité (kWh/m²) | 3,80 |
| Propane (kWh/m²) | 13,10 |
| Eau de boisson + refroidissement (L/m²) | 140 |
| Eau de nettoyage (L/m²) | 2,41 |
| Quantité de fuel (kWh/m²/an) | 14 |

2.4. Evaluation de stratégies alimentaires

Au-delà des objectifs de formulation, une stratégie alimentaire a été envisagée conduisant à une amélioration des performances zootechniques. Elle utilise un aliment moins concentré en énergie et plus concentré en acides aminés, (Tableau 5). La question était de savoir si l'amélioration des performances compenserait, à l'échelle du produit, l'augmentation des impacts environnementaux de l'aliment associée à une plus forte concentration en acides aminés malgré une déconcentration en énergie.

3. Résultats

3.1. Impacts de l'aliment témoin

L'aliment témoin est l'aliment formulé à moindre coût et utilisant la liste des matières premières disponibles (LIM).

3.1.1. Effet du contexte économique

Le contexte économique modifie profondément la composition de la formule. Les teneurs en maïs et en tourteau de soja ne cessent de diminuer entre septembre

2011, juin 2012, août 2013 et février 2014 tandis que le tourteau de tournesol riche en protéines occupe une part plus importante de la formule.

Le prix varie ainsi de façon importante (plus de 11 %) du fait 1) des modifications de composition et 2) de la variabilité des prix des matières premières.

La modification de composition de la formule, et notamment de la teneur en tourteau de soja, entraîne des modifications significatives de la consommation de phosphore, du changement climatique et de l'occupation des terres, respectivement de -12 %, -13 % et +17 % entre septembre 2011 et février 2014.

3.1.2. Effet du scénario d'approvisionnement

La composition de la formule est très peu influencée par le scénario d'approvisionnement. Seuls les scénarios « local » et « Grand Ouest » se distinguent par une utilisation supérieure de tourteau de soja (+21 % à +36 % par rapport aux autres scénarios), réduisant d'autant l'utilisation de tourteau de tournesol. Aussi, le prix de la formule varie relativement peu (jusqu'à 3 %). En revanche, certains critères environnementaux varient de façon significative entre les scénarios d'approvisionnement, selon que le transport contribue peu ou beaucoup à l'impact considéré. C'est le cas de la consommation d'énergie non renouvelable qui diminue de plus de 10 % entre le scénario éloigné route et le scénario local.

Tableau 6 : Valeurs de référence utilisées dans la fonction multiobjectif pour les différents critères de formulation
Aliment moyen = 5 % Démarrage + 20 % Croissance + 75 % Finition

P : consommation de phosphore ; EN : consommation d'énergie ; CC : changement climatique ; AC : acidification ; EU : eutrophisation ; OT : occupation des terres

| Critère | Unité | Valeurs de référence | | | |
|---------|------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|--------|
| | | Démarrage 0 – 10 j | Croissance 11 – 20 j | Finition 21 – 36 j | Moyen |
| P | kg P | 0,0119 | 0,0103 | 0,0085 | 0,0090 |
| EN | MJ | 7,93 | 7,89 | 7,69 | 7,74 |
| CC | kg CO2 eq | 0,91 | 0,87 | 0,86 | 0,86 |
| AC | molc H+ eq | 0,0120 | 0,0122 | 0,0122 | 0,0122 |
| EU | kg PO43-eq | 0,0046 | 0,0047 | 0,0045 | 0,0046 |
| OT | m²a | 1,53 | 1,56 | 1,50 | 1,51 |

3.1.3. Valeurs de référence des critères de formulation

Le prix de référence est défini comme le prix de la formule à moindre coût pour le scénario Grand Ouest en juin 2012. Les valeurs d'impacts environnementaux de référence sont définies comme les impacts environnementaux moyens pour les formules à moindre coût des différents contextes économiques pour le scénario Grand Ouest (Tableau 6). En effet, les impacts environnementaux étant variables en fonction du contexte économique, utiliser la moyenne comme référence permet de définir l'objectif de réduction par rapport à une référence fixe.

La figure 1 illustre, à titre d'exemple, la composition des formules démarrage, croissance et finition obtenue pour l'aliment témoin formulé à moindre coût dans le scénario Grand Ouest, LIM, en juin 2012.

Par la suite, l'aliment moyen est obtenu en pondérant les formules démarrage, croissance et finition en tenant compte des quantités consommées par un lot sur la période d'élevage représentant respectivement 5 %, 20 % et 75 %.

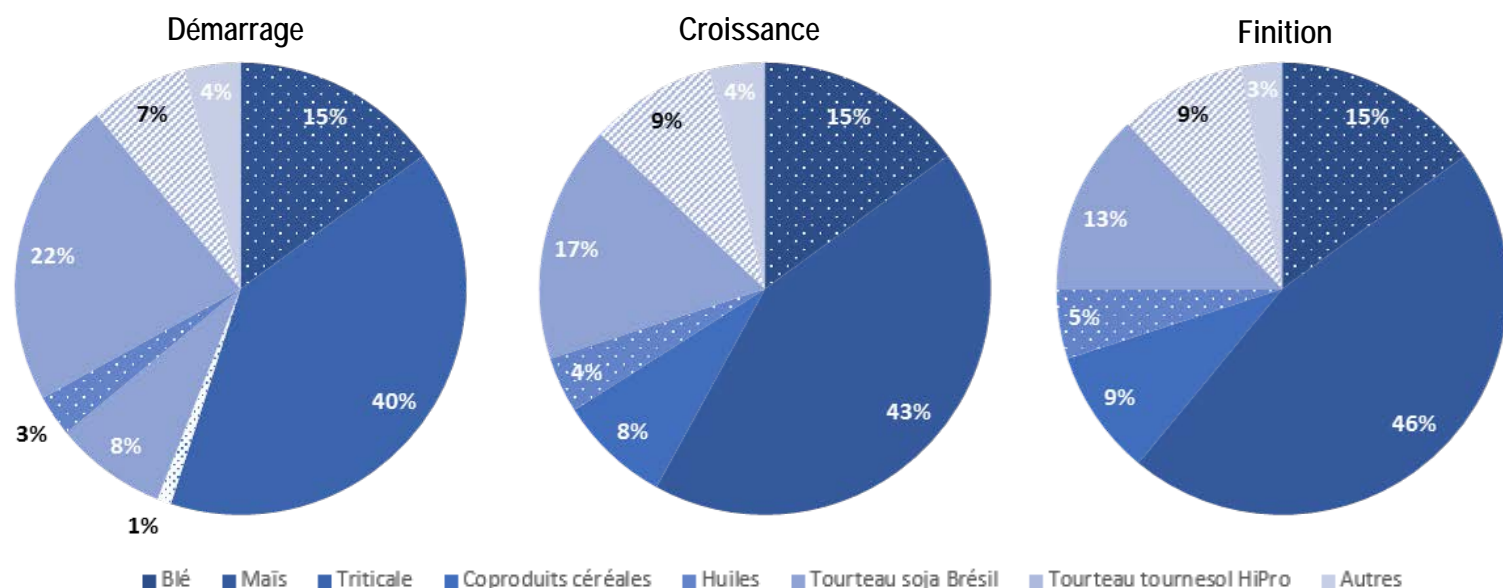


Figure 1 : Composition des aliments démarrage, croissance et finition de la gamme à moindre coût – Grand-Ouest ; LIM ; juin 2012

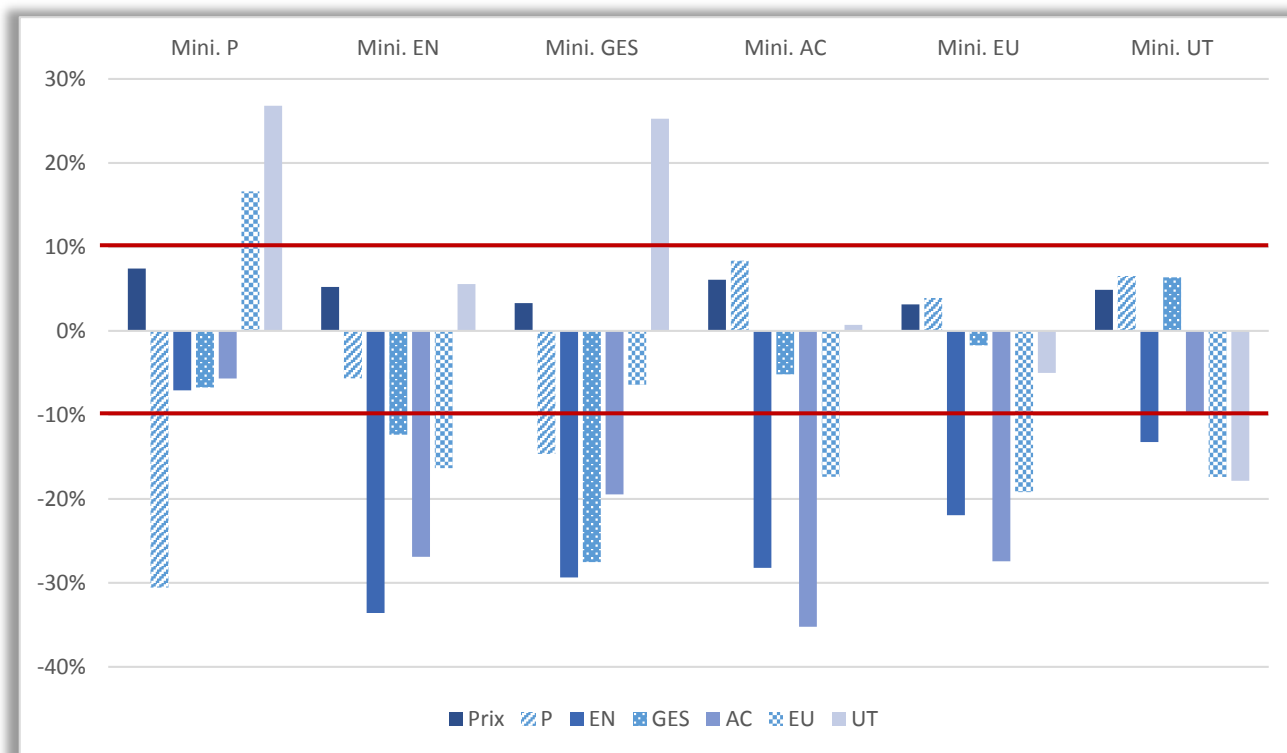


Figure 2 : Evolution des critères économiques et environnementaux par rapport à l'aliment de référence lors de la minimisation des critères environnementaux individuellement (ex : mini. P = formulation minimisant la consommation de phosphore).

P : consommation de phosphore ; EN : consommation d'énergie ; CC : changement climatique ; AC : acidification ; EU : eutrophisation ; OT : occupation des terres

Les seuils représentés à -10 % et +10 % permettent d'identifier les modifications significatives des impacts environnementaux des formules obtenues.

3.2. Potentiel de réduction des impacts environnementaux

3.2.1. Intérêt du sorgho et du pois

Une première formulation à moindre coût avec la liste de matières premières en disponibilité illimitée (NLIM) permet de mettre en évidence un potentiel de réduction par rapport au contexte LIM de plusieurs impacts environnementaux uniquement à travers l'introduction de matières premières (20 % de sorgho et jusqu'à 15 % de pois).

Ainsi, la consommation d'énergie non renouvelable, le changement climatique et l'acidification sont respectivement réduits de 12 %, 12 % et 19 % en moyenne pour les formules Grand Ouest. Néanmoins, si le prix tend à diminuer par rapport à l'aliment témoin (entre -1 % et -4 % selon le contexte économique) le critère occupation des terres pour ces formules augmente de 17 % en moyenne.

3.2.2. Potentiel de réduction de chacun des impacts environnementaux et conséquences

Le potentiel de réduction des impacts environnementaux de l'aliment dépend à la fois des contraintes de formulation (contraintes sur les nutriments et les matières premières), du contexte économique, du scénario d'approvisionnement et, comme montré précédemment, des matières premières disponibles. L'ensemble des optimisations environnementales présentées dans cet

article utilisent la liste de matières premières NLIM. Les résultats sont comparés à la référence décrite au paragraphe 2.1.3..

Le potentiel de réduction d'un impact est calculé par différence entre l'aliment de référence et l'aliment formulé de façon à minimiser cet impact. Aussi, la fonction objectif n'est plus le prix mais l'impact environnemental considéré comme détaillé au paragraphe 1.2.3.1.).

Quel que soit l'impact environnemental minimisé, le prix de l'aliment augmente (Figure 2). Néanmoins, l'optimisation environnementale, dès lors qu'elle ne prend en compte qu'un seul critère, permet de montrer un **potentiel important de réduction des impacts environnementaux de l'aliment** (de -18 % à -35 % selon l'indicateur). Cependant, la réduction significative d'un impact n'est pas sans conséquence sur les autres critères environnementaux. Par exemple, pour atteindre le potentiel de réduction de la consommation de phosphore de -31 %, il faut accepter une augmentation de l'eutrophisation et de l'occupation des terres de respectivement 17 % et 27 %.

Ces résultats montrent d'une part les marges de progrès possible pour réduire le bilan environnemental de l'alimentation des animaux d'élevage et soulignent d'autre part le **risque de transfert de pollution** lorsque la

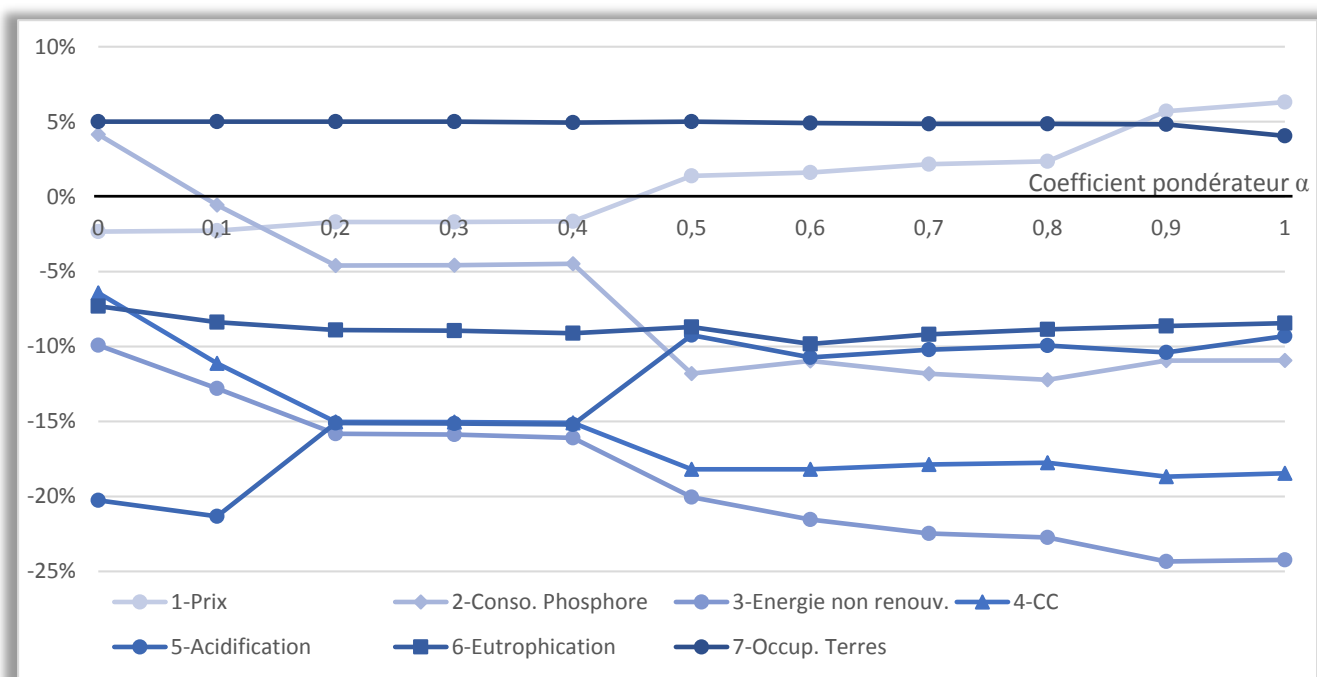


Figure 3 : Evolution moyenne du prix et des indicateurs environnementaux par rapport à l'aliment de référence et en fonction de la valeur du coefficient α ($\in[0;1]$), pondérateur des critères environnementaux dans la fonction multiobjectif, dans le contexte Grand Ouest, juin 2012, NLIM. Pour $\alpha = 0$: formulation à moindre coût ; pour $\alpha = 1$: formulation multiobjectif n'utilisant que les critères environnementaux P, EN, CC, OT. Conso. : consommation ; renouvel. : renouvelable ; CC : changement climatique ; occup. : occupation

fonction objectif ne tient compte que d'un seul critère. Une méthode de formulation multiobjectif a donc été développée afin de rechercher le meilleur compromis entre les différents critères environnementaux sans oublier le critère économique.

3.3. Formulation d'un éco-aliment

Différentes pondérations (soient différentes valeurs de α) entre les critères économique et environnementaux sont testées afin d'identifier les éco-aliments tels que P, EN, CC et OT soient réduits de 10 % au moins, AC et EU n'augmentent pas de plus de 5 % et le prix soit le plus faible (Figure 3).

Il apparaît alors que l'antagonisme entre certains critères environnementaux, et notamment entre P et CC d'un côté et OT de l'autre, (Figure 2) ne permet pas d'obtenir un éco-aliment comme il a été défini au paragraphe 2.2.5.. La formulation d'un compromis est d'autant plus délicate que les contraintes nutritionnelles sont contraignantes si bien que les aliments démarrage et croissance, plus concentrés en protéines, ont des potentiels de progrès moins importants que l'aliment finition.

Dans le cas du poulet de chair, pour le scénario Grand Ouest - NLIM - juin 2012, la meilleure solution, quelle que soit la phase alimentaire, est obtenue pour un coefficient $\alpha = 0,5$ (Figure 3). Sur l'ensemble de la gamme alimentaire, les éco-aliments permettent alors une réduction significative de la consommation de

phosphore, de la consommation d'énergie non renouvelable et du changement climatique de respectivement 12 %, 20 % et 18 %. L'occupation des terres reste inchangée tandis qu'acidification et eutrophication liées aux matières premières tendent à diminuer. Le prix quant à lui augmente de façon très raisonnable (+1 %).

Au-delà de $\alpha = 0,5$, la réduction des impacts environnementaux est plus limitée tandis que le prix augmente de façon importante. De plus, la compétition entre les critères semble s'exacerber.

En termes de composition, cela se traduit par une diversification de la formule et une augmentation de la teneur en coproduits. Le maïs est en partie remplacé par du sorgho, les coproduits de blé remplacent les coproduits de maïs, le pois et le colza (graines et tourteau) se substituent au tourteaux de soja et de tournesol et l'huile de colza remplace l'huile de soja.

3.4. L'éco-aliment à l'échelle de l'élevage

La simulation de l'utilisation de l'éco-aliment montre un réel intérêt de la formulation multiobjectif pour la réduction des impacts environnementaux de la production de poulet de chair. En effet, l'éco-aliment formulé dans le contexte Grand-Ouest et NLIM en juin 2012, permet une réduction significative de l'utilisation de phosphore, de la consommation d'énergie et du changement climatique, respectivement de 11 %, 18 % et 17 %, par kilo de poulet vif produit, avec une tendance à la réduction de

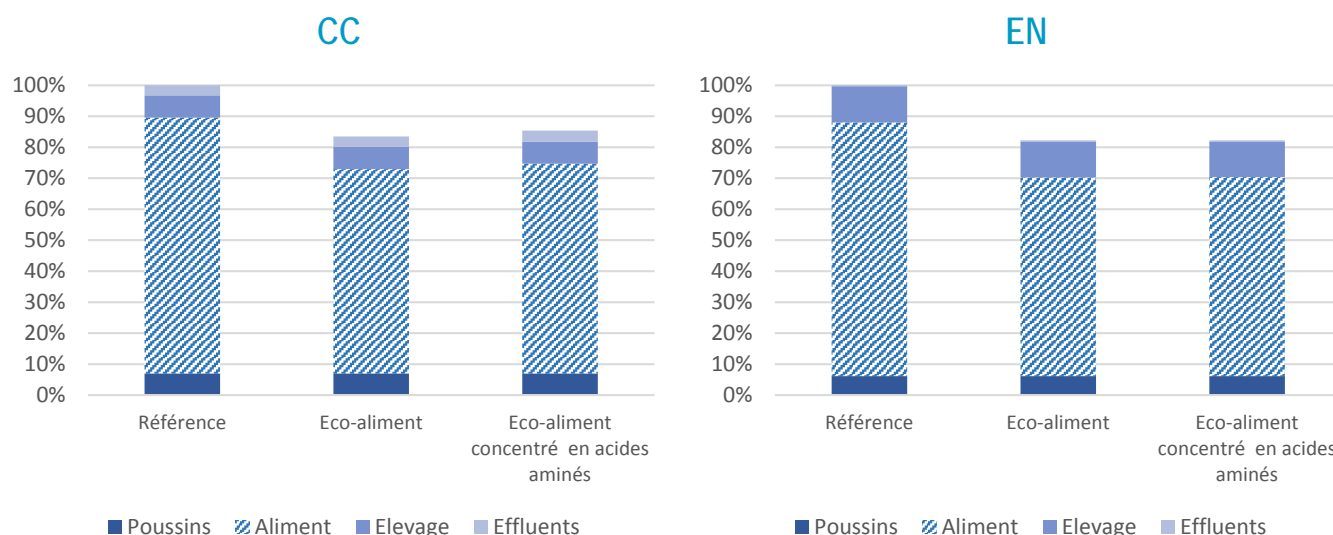


Figure 4 : Composition des impacts environnementaux « changement climatique (CC) » et « consommation d'énergie non renouvelable (EN) » calculés à l'échelle de l'atelier de production de poulet de chair respectivement en kg eq. CO₂ et en MJ pour 1 kilo de produit vif et exprimés en base 100 par rapport au témoin.

La référence correspond à l'aliment témoin (formulation à moindre coût, Grand Ouest, juin 2012, LIM) ; l'éco-aliment correspond à la formule obtenue en formulation multiobjectif avec le coefficient $\alpha = 0,5$ (Grand Ouest, juin 2012, NLIM) ; l'éco-aliment concentré en acides aminés correspond à la formule concentrée en acides aminés obtenue en formulation multiobjectif avec le coefficient $\alpha = 0,5$ (Grand Ouest, juin 2012, NLIM).

Dans la situation de référence comme avec l'utilisation d'un éco-aliment, l'aliment reste le premier contributeur pour ces impacts environnementaux. Néanmoins, la formulation multiobjectif permet de réduire le poids de l'aliment dans les impacts environnementaux de l'élevage.

l'eutrophisation et sans modification de l'acidification et de l'occupation des terres. Par ailleurs, ces effets positifs s'accompagnent d'une faible augmentation du coût de production du vif (< 1 %), sans incidence sur le coût de production du filet (< 0,5 %).

3.5. Conséquences de stratégies alimentaires

3.5.1. L'éco-aliment « économique »

Formulation

L'éco-aliment en finition étant plus facile et moins onéreux à obtenir qu'en phase démarrage et croissance, il a été proposé de rechercher une même réduction d'impact environnemental à l'échelle de la gamme en concentrant les efforts sur la phase de finition.

Pour cela les aliments démarrage et croissance sont formulés à moindre coût, avec la liste de matières premières NLIM et avec des contraintes maximales pour l'ensemble des critères environnementaux fixées à +5 % par rapport à la référence. L'aliment finition est formulé à l'aide de la fonction multiobjectif.

La meilleure solution s'avère être l'association des aliments démarrage et croissance formulés à moindre coût avec l'aliment finition obtenu par formulation multiobjectif pour le coefficient $\alpha = 0,5$. Si la réduction de la consommation d'énergie et de l'impact changement climatique restent significatives (-17 % et -16 % respectivement), seule une tendance à la réduction de la consommation de phosphore est observée. Par ailleurs, l'acidification est réduite (-12 %), l'eutrophisation tend à diminuer et l'occupation des terres est inchangée. Enfin,

cette solution est plus économique puisqu'elle n'entraîne pas d'augmentation du prix de l'aliment.

Cette dernière affirmation reste à nuancer car la formule obtenue utilise des matières premières peu disponibles (sorgho et pois). Dans l'hypothèse où elles seraient produites pour une utilisation en alimentation animale et en quantité plus importante, il faudrait valider le prix d'achat de ces matières premières.

Effets à l'échelle de la production de poulet

Les résultats à l'échelle du produit sont similaires avec une réduction significative de la consommation d'énergie et de l'impact changement climatique de 13 % par kilo de vif et une tendance à la réduction de la consommation de phosphore. Les autres impacts environnementaux ne sont pas modifiés. Le coût de production quant à lui ne subit qu'une légère hausse de 0,6 % pour le vif et de 0,2 % pour le filet.

3.5.2. L'éco- aliment « concentré en acides aminés et déconcentré en énergie »

Distribuer un aliment moins riche en énergie (-50 kcal/kg) et plus concentré en acides aminés (+0,15 points de lysine digestible, autres acides aminés équilibrés selon les recommandations de la protéine idéale), doit permettre d'améliorer les performances zootechniques (indice de consommation, GMQ et rendements). Qu'en est-il en termes d'impact environnemental ?

Aliment à moindre coût concentré en acides aminés et déconcentré en énergie

Après modification des contraintes de formulation, les aliments démarrage, croissance et finition sont formulés à moindre coût avec la liste des matières premières en disponibilité non limitée pour le scénario Grand Ouest.

Quel que soit le contexte économique, la formule concentrée en acides aminés et moins concentrée en énergie coûte plus cher que la formule témoin (+11 €/t à +22 €/t). En effet, la concentration en acides aminés (et donc en protéines) nécessite d'utiliser plus de tourteau de soja et plus d'additifs (acides aminés libres). Ce surcoût n'est pas compensé par la baisse d'énergie.

Pour ce qui est des impacts environnementaux, seuls l'acidification et l'occupation des terres ont significativement évolué avec la modification des contraintes nutritionnelles. La formule utilise moins de maïs, expliquant une réduction de l'acidification de 15 % tandis que l'incorporation de sorgho, de pois et de tourteau de tournesol riche en protéines entraînent une augmentation de l'occupation des terres de 17 %.

Eco-aliment concentré en acides aminés et déconcentré en énergie

En formulant les aliments concentrés à l'aide de la fonction multiobjectif, le but était d'identifier un aliment concentré dont l'impact environnemental serait réduit par rapport à l'aliment de référence. Ainsi, au niveau du maillon élevage, la réduction du bilan environnemental de l'alimentation serait amplifiée par l'amélioration des performances.

Pour un surcoût de 7 %, il est possible de formuler un aliment concentré dont le bilan environnemental est amélioré. Si l'occupation des terres n'est pas modifiée de façon significative, les impacts consommation de phosphore et eutrophisation potentielle tendent à être réduits. De plus, les impacts consommation d'énergie, changement climatique et acidification sont significativement améliorés de respectivement 16 %, 12 % et 11 %.

Dans l'aliment obtenu, l'huile de colza remplace l'huile de soja et le sorgho remplace le maïs. De même, les coproduits de blé remplacent les coproduits de maïs et le tourteau de tournesol laisse place aux tourteaux de colza et de soja auxquels s'ajoutent des graines de colza, du pois et des acides aminés libres pour adapter le profil à la protéine idéale.

Effets à l'échelle de la production de poulet

L'amélioration des performances zootechniques permet de potentialiser les bénéfices environnementaux et conduit ainsi à une réduction significative de la consommation d'énergie (-18 %) et du changement climatique (-15 %) (Figure 4). Consommation

de phosphore et eutrophisation tendent à diminuer tandis qu'acidification et occupation des terres restent inchangées. L'amélioration des performances permet d'amortir largement la répercussion de l'augmentation du prix de l'aliment (+7 %) sur le coût de production (+0,6 %). L'investissement s'avère pertinent puisque le coût de production du filet est finalement amélioré (-1 %).

5. Discussion

5.1. Robustesse des résultats

Les résultats obtenus laissent entrevoir une importante marge de progrès en termes de réduction des impacts environnementaux de l'élevage, relativement facile à satisfaire en modifiant la composition des aliments. Néanmoins, ces résultats dépendent entre autres 1) de l'incertitude et de la variabilité des ACV sur les matières premières agricoles et 2) des choix méthodologiques pour le calcul de ces ACV.

En effet, la base de données contient des valeurs d'ACV moyennes pour les matières premières et ne permet pas de juger de la variabilité et de la sensibilité des estimations en fonction des spécificités régionales ou des pratiques culturelles. Ainsi, en fixant le seuil de significativité à 10 %, nous nous sommes assurés de conclure à une modification des impacts lorsqu'elle est effective.

Par ailleurs, le choix d'une allocation massico-économique confère aux coproduits (moins bien valorisés que les produits principaux) un « avantage » environnemental. Cela explique leur introduction en quantités importantes lors de la formulation environnementale. Le choix d'une autre méthode d'allocation conduirait probablement à des conclusions différentes. De même, les résultats seraient modifiés dans un autre contexte économique. Toutefois, la valorisation des coproduits végétaux par les productions animales est un atout que promeut le choix de l'allocation massico-économique.

5.2. Une méthode de formulation originale et efficace

L'intérêt de considérer simultanément plusieurs critères de formulation afin d'éviter les transferts de pollution a été illustré. La méthode de formulation multiobjectif utilisant des indicateurs économiques et environnementaux est toute indiquée pour guider toute action visant à réduire l'impact environnemental de l'alimentation animale en limitant le surcoût. La même démarche dans un contexte de disponibilité des matières premières plus réduite (LIM) conduit aux mêmes conclusions. Néanmoins, les marges de progrès sont plus restreintes.

Ainsi, la méthode de formulation proposée ici est :

- **Simple** : elle utilise la programmation linéaire et minimise une fonction objectif tout comme la formulation à moindre coût. A ce titre, elle doit

pouvoir être reproduite dans le cas de la multi-formulation pour mieux intégrer les compétitions d'usages des matières premières pour l'alimentation des différentes espèces animales.

- **Originale** : elle considère simultanément plusieurs critères de différentes natures dans la fonction à optimiser.
- **Souple** : les contraintes et les pondérations attribuées aux critères peuvent être adaptés pour traduire les objectifs du formulateur et de la filière. De plus, la méthode permet d'explorer un ensemble de solutions afin d'identifier le meilleur compromis. Enfin, elle peut être étendue à d'autres critères et notamment combiner des indicateurs économiques, environnementaux et sociaux afin de couvrir les trois dimensions de la durabilité.

Pour finir, si le marché est actuellement en transition vers une offre « durable » généralisée, les progrès environnementaux dépendront de la disponibilité des matières premières (volumes et prix) et de la **mise en œuvre, par le terrain**, d'une méthode multiobjectif pour la formulation d'aliments composés.

6. Conclusion

Le projet ECOALIM a permis la **construction d'une base de données homogène d'impacts environnementaux par ACV** pour les matières premières utilisées en alimentation animale en France. Utilisées en formulation, ces données permettent de rechercher des aliments dont l'impact environnemental est réduit. Pour cela, **une méthode originale de formulation multiobjectif a été développée**. Elle utilise simultanément des indicateurs

économiques et environnementaux et permet ainsi d'identifier des éco-aliments en **évitant les transferts de pollution et en maîtrisant les coûts**.

La réduction des impacts environnementaux de l'aliment se répercute alors sur le produit. Par exemple en poulet de chair, l'utilisation d'un éco-aliment dont les impacts potentiels pour la consommation de phosphore, la consommation d'énergie non renouvelable et le changement climatique sont respectivement réduits de 12 %, 20 % et 18 % conduit à une réduction similaire (respectivement 11 %, 18 % et 17 % par kilo de poulet vif produit) des impacts environnementaux du produit, sans effet négatif sur les autres impacts environnementaux et pour une augmentation du coût de production inférieure à 1 %.

La méthode présentée propose une nouvelle vision de la formulation pour une optimisation des aliments prenant en compte les attentes des maillons de la filière (coût, apports nutritionnels) et de la société (impacts environnementaux). Naturellement, toute amélioration des pratiques culturales en amont et/ou des performances zootechniques en aval de la fabrication d'aliment permettrait de réduire d'autant plus les impacts environnementaux de l'activité d'élevage.

Enfin, des marges progrès plus importantes encore pourraient être attendues si **l'optimisation se faisait à l'échelle du produit** (poulet vif, morceaux) plutôt qu'à l'échelle de l'aliment de façon à optimiser non seulement la composition de l'aliment mais la stratégie alimentaire dans son ensemble (composition nutritionnelle, période de distribution de l'aliment).

Références bibliographiques

- Castrodeza C., Lara P., Peña T., 2005. Multicriteria fractional model for feed formulation: economic, nutritional and environmental criteria. *Agricultural Systems*, Vol. 86, p76-96.
- da Silva V.P., van der Werf H.M.G., Soares S.R., Corson M.S., 2012. Environmental impacts of French and Brazilian broiler chicken production scenarios: An LCA approach, *Journal of Environmental Management*, Vol. 133, January 2014, p.222-231.
- Dauguet S., Tailleur A., Wilfart A., Willmann S., Laustriat M., Espagnol S., 2015 (communication soumise). Variability of the LCIA results of French cereal and oilseed feedstuffs according different agricultural practices. LCM 2015.
- Dubeau F., Julien P.-O., Pomar C. Modèle statique multicritère de formulation d'une diète pour porc en croissance.
- Dubeau F., Julien P.-O., Pomar C., 2011. Formulating diets for growing pigs: economic and environmental considerations. *Annals of Operations Research*, Vol. 190, p 239-269.
- Dusart L., Chenut R., Henninot E., Chevalier D., Bouvarel I., 2016. Amélioration de la compétitivité des filières de production de poulet de chair. *Rapport FrancAgriMer*, 47p.
- Ellies M.P., 2014. Les filières animales françaises : Caractéristiques, enjeux et perspectives. Editions Lavoisier, collection Synthèse Agricole, 527p.
- Guillaumin A., Dockès A.C., Tchakérian E., Daridan D., Gallot S., Hennion B., Lasnier A. et Perrot C., 2008. Demandes de la société et multifonctionnalité de l'agriculture : attitudes et pratiques des agriculteurs. In *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* n°56, décembre 2008, p.45-66.
- ISO International Standard 14040, 1997. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre. International Organisation for Standardisation, Genève, Suisse.
- ITAVI, Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, 2008. Les consommations d'énergie dans les bâtiments avicoles, 25 p.
- Lara P., 1993. Multiple objective fractional programming and livestock ration formulation: a case study for dairy cow diets in Spain. *Agricultural Systems*, Vol. 41, p 321-334.
- 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*, Vol. 115, p 1860-1874.
- Moraes L.E., Fadel J.G., Castillo A.R., Casper D.P., Tricarico J.M., Kebreab E., 2015. Modelling the trade-off between diet costs and methane emissions: a goal programming approach. *Journal of Dairy Science*, Vol. 98, No. 8, p 5557-5571.
- 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*, Vol. 28, June 2012, p.215-224.
- Oishi K., Kumagai H., Hirooka H., 2011. Application of the modified feed formulation to optimize economic and environmental criteria in beef cattle fattening systems with food by-products. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 165, p 38-50.
- Pelletier N., 2008. Environmental performance in the US broiler poultry sector: Life cycle energy use and greenhouse gas, ozone depleting, acidifying and eutrophying emissions, *Agricultural Systems*, Vol. 98, September 2008, p.67-73.
- Pomar C., Dubeau F., Létourneau-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*, Vol. 111, p 16-27.
- Protino J., Magdelaine P., Berri C., Méda B., Ponchant P., Dusart L., Chevalier D., Dezat E., Lescoat P., Bouvarel I., 2015. OVALI : un outil pratique d'évaluation de la durabilité des filières avicoles 1 - Evaluer l'existant pour identifier des marges de progrès. 11èmes Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras, 25-26 mars, Tours, France, p.1047-1053.
- Tongpool R., Phanichavalit N., Yuvaniyama C., Mungcharoen T., 2012. Improvement of the environmental performance of broiler feeds: a study via life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 35, p16-24.

Références bibliographiques (suite)

- Wilfart A., Dauguet S., Tailleur A., Willmann S., Laustriat M., Magnin M., Garcia-Launay F., Gac A., Espagnol S., 2015 (communication soumise) a. ECOALIM : une base de données des impacts environnementaux des matières premières utilisées en France pour l'alimentation animale. Journées 3R 2015.
- Wilfart A., Dauguet S., Tailleur A., Willmann S., Laustriat M., Magnin M., Garcia-Launay F., Gac A., Espagnol S., 2015 (communication soumise) b. LCIA results of feedstuffs for French livestock. EAAP, 2015.

Abstract

A novel feed formulation method

Multiobjective formulation efficiency to improve environmental impacts of broiler production

Livestock production is facing many issues and is especially expected by society to reduce its environmental footprint. In particular, animal production should reduce the environmental impacts of animal feed since it remains the first contributor to climate change in broiler production for example. In this challenging context, the **ECOALIM project** aimed at providing references, methodologies and tools in order to investigate feeding strategies taking into account economic and environmental constraints. This project was involving different animal productions: broiler, porc, dairy and meat bovine. First, there was the generation and dissemination of a data base providing LCA results for animal feedstuff. Then, **the development of a feed formulation methodology using multicriteria optimisation** enabled us to identify feed composition and feeding strategies that help reducing the environmental footprint of animal feed and even animal production.