

LA FORMULATION BILINEAIRE PERMET DE MINIMISER LE COUT ALIMENTAIRE ET LES REJETS EN ALIMENTATION DE PRECISION

Dusart Léonie¹, Rhoulam Younes², Méda Bertrand²

¹ITAVI - Centre INRA Val de Loire 37380 NOUZILLY,

²BOA, INRA, Université de Tours, 37380 NOUZILLY

dusart@itavi.asso.fr

RÉSUMÉ

En poulet de chair, l'alimentation multiphase, aujourd'hui généralisée sur le terrain, se traduit par des apports nutritionnels constants sur des périodes successives d'une dizaine de jours, alors même que les besoins des animaux évoluent au sein de ces périodes. En résultent alors des excès qui entraînent une augmentation du coût alimentaire et des rejets d'azote et de phosphore dans l'environnement, ou des carences qui limitent les performances. De son côté, l'alimentation de précision propose d'ajuster quotidiennement les apports nutritionnels aux besoins des animaux en croissance. Deux questions se posent alors : comment la mettre en œuvre en production de poulets de chair ? Et quels gains peut-on espérer ? La stratégie évaluée ici consiste à distribuer aux animaux une ration composée de couples de pré-aliments associés en proportions variables quotidiennement afin de reconstituer un aliment complet le plus adapté possible aux besoins des animaux. L'optimisation simultanée de la composition des pré-aliments et de leurs proportions quotidiennes, de façon à minimiser le coût, constitue un problème d'optimisation bilinéaire, résolu à l'aide du solveur Knitro. Les stratégies alimentaires multiphase (croissance, finition, retrait) et alimentation de précision (4 pré-aliments : A, B, C et D) ont été comparées dans le cas de poulets de chair nourris de 10 à 47 jours. Par rapport à la stratégie multiphase, la stratégie d'alimentation de précision utilisant successivement les mélanges A-B, puis B-C, puis C-D, permettrait une réduction du coût alimentaire de 5,6 % (moyenne de 4 contextes de prix) et des rejets d'azote et de phosphore de 11,4 % et 11,3 % respectivement. Sachant que les réductions maximales calculées, obtenues pour un aliment complet optimisé par jour (multiphase quotidien), sont de 6,3 %, 12,1 % et 12,1 % en moyenne pour le coût alimentaire, les rejets d'azote et de phosphore respectivement ; la stratégie d'alimentation de précision utilisant 4 pré-aliments s'avèrerait un excellent compromis permettant également de limiter le nombre d'aliments différents à produire et à livrer sur l'élevage. Ces résultats prometteurs devront néanmoins être validés à travers un essai zootechnique avant d'être déployés sur le terrain.

ABSTRACT

Bilinear feed formulation enables maximum reduction of feed cost and excretion in precision feeding

Multiphase feeding is commonly used in broiler production. Nutritional values of feeds are set for the successive phases of about ten days. Since broilers nutritional requirements vary every day, multiphase feeding may lead to excessive or insufficient nutritional intake and impact performances, feed cost and excretion (nitrogen and phosphorus). On the opposite, precision feeding aims at a dynamic adjustment of nutritional intake to meet daily requirements. Two questions arise: How precision feeding can be implemented in commercial farms? What are the expected gains? The precision feeding strategy assessed here consists in feeding couples of pre-diets mixed each day in variable proportions in order to recreate a complete diet that best meets the daily requirements of the birds. Simultaneous optimisation of pre-diet composition and daily incorporation rates of pre-diets while minimising feed cost is a bilinear optimisation problem solved using Knitro solver. Multiphase feeding (grower, finisher 1, finisher 2) and precision feeding (4 pre-diets A, B, C and D) strategies were compared in the case of broilers fed between 10 to 47 days of age. Compared to multiphase feeding, precision feeding strategy using successively A+B, then B+C, then C+D enables a reduction of feed cost of 5.6% (average of 4 feedstuff prices contexts) and a reduction of nitrogen and phosphorus excretion of 11.4% and 11.3% respectively. Maximal reductions obtained with one diet per day reach 6.3%, 12.1% and 12.1% in average for feed cost, nitrogen and phosphorus excretion respectively. Thus, precision feeding using 4 pre-diets appears to be a great compromise limiting the number of diets to produce and transport. These promising results should however be validated first in experimental conditions before implementing this innovative feeding strategy in commercial farms.

INTRODUCTION

La recherche d'une meilleure efficacité des élevages passe notamment par une meilleure valorisation de l'alimentation permettant de réduire le coût alimentaire d'une part et les impacts environnementaux d'autre part pour un élevage finalement plus durable. Une des techniques disponibles pour améliorer la valorisation de l'alimentation est un meilleur ajustement des apports aux besoins nutritionnels en augmentant le nombre de phases alimentaires au cours de l'élevage (RMT Elevage et Environnement, 2010). C'est ce que propose le concept d'alimentation de précision avec un ajustement quotidien des apports (Pomar *et al.*, 2009).

La stratégie d'alimentation de précision évaluée dans cet article consiste à utiliser des couples de pré-aliments associés en proportions variables pour reconstituer un aliment complet adapté chaque jour aux besoins du poulet de chair. Se pose alors la question de la composition nutritionnelle de chaque pré-aliment et des proportions en mélange permettant de minimiser le coût alimentaire.

Ce nouveau problème de formulation constitue un problème d'optimisation bilinéaire non convexe. L'objectif de ce travail était de mettre en œuvre la formulation bilinéaire et d'évaluer le potentiel de la stratégie d'alimentation de précision utilisant 4 pré-aliments.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Description du système

Les simulations ont été réalisées dans le cas d'un poulet Ross 308 « tout-venant » (moyenne mâle/femelle) nourri de 10 à 47 jours selon (Figure 1):

- 1) une stratégie multiphase témoin composée de 3 aliments (croissance, finition, retrait) (AMP-3) ;
- 2) une stratégie d'alimentation de précision utilisant 4 pré-aliments (AP-4) distribués en mélanges par 2 ;
- 3) une stratégie multiphase optimale composée d'un aliment par jour (AMP-38).

Les performances de croissance utilisées pour estimer les besoins des animaux sont issues du guide de spécifications technique Aviagen (Ross 308 broiler: performance objectives, 2014) tout comme les quantités d'aliments consommées.

Pour chacune des stratégies, il a été considéré que les choix de niveaux nutritionnels permettaient de conserver les mêmes performances (indice de consommation = 1,79 et poids vif = 3276 g à 47 jours).

Les matières premières étaient caractérisées par leur profil nutritionnel de référence (Sauvant *et al.*, 2004) et un prix (4 contextes économiques ont été considérés : septembre 2011, juin 2012, août 2013 et février 2014) (source ITAVI : Dépêche- Le petit meunier et communications personnelles).

1.2. Estimation des besoins quotidiens

Contrairement à l'alimentation multiphase, l'alimentation de précision nécessite d'estimer les besoins quotidiens des animaux. Un travail préalable a permis de développer un modèle d'estimation des besoins quotidiens en énergie métabolisable (EM), lysine digestible et phosphore disponible des poulets de chair (Méda *et al.*, 2019). Les besoins pour les protéines (MAT) et pour les autres acides aminés sont calculés par rapport à la lysine de façon à respecter les recommandations d'Ajinomoto Eurolysine en termes d'équilibre entre acides aminés. Le besoin en calcium est calculé par rapport au phosphore disponible de façon à respecter un rapport calcium/phosphore disponible de 2.

1.3. Modèle de formulation linéaire

Il s'agit de la méthode habituellement utilisée pour formuler des aliments. Elle est également appelée formulation à moindre coût.

1.3.1. Contraintes nutritionnelles

Le modèle utilise un jeu de contraintes nutritionnelles par phase (3 pour AMP-3 et 38 pour AMP-38). Pour chacune des phases, la contrainte minimale pour un nutriment correspond au besoin estimé par le modèle au moment de la phase où il le plus élevé. Dans le cas particulier de la stratégie AMP-3, il s'agit du besoin du dernier jour de la phase pour l'EM et du besoin du premier jour de la phase pour l'ensemble des autres nutriments. Ainsi, la stratégie 3 phases constitue un témoin positif sans période de carence nutritionnelle contrairement à ce qui peut être pratiqué sur le terrain.

Pour chaque phase, les contraintes nutritionnelles sont appliquées à l'unique formule recherchée.

1.3.2. Autres contraintes

Des contraintes minimum et maximum permettent également de maîtriser les taux d'incorporation de matières premières (ex : $15\% \leq [\text{blé}] \leq 55\%$) et de familles de matières premières (ex : $0\% \leq [\text{coproduits de céréales}] \leq 12\%$) pour chacun des aliments. Ces contraintes sont issues d'un consensus entre plusieurs firmes services.

Pour finir, une contrainte permet de s'assurer que la somme des taux d'incorporation des matières premières est strictement égale à 100 % pour chacun des aliments.

1.3.3. Optimisation

Comme son nom l'indique, la formulation à moindre coût minimise le coût de l'aliment. La fonction objectif est égale au prix de la formule. Le résultat de la formulation est la composition en matières premières des aliments. La résolution des problèmes d'optimisation linéaire (AMP-3 et AMP-38) a été obtenue à l'aide du solveur Minos.

1.4. Modèle de formulation bilinéaire

1.4.1. Contraintes nutritionnelles

Le modèle utilise des contraintes nutritionnelles journalières pour chaque nutriment, soit ici 38 couples de contraintes minimum/maximum pour chaque

nutriment. Pour chaque jour et chaque nutriment, la contrainte minimale correspond au besoin estimé par le modèle pour l'EM, la lysine digestible et phosphore disponible. Pour les niveaux de MAT, d'acides aminés autres que la lysine et le calcium, l'approche décrite en 1.2. a été utilisée.

Les contraintes sont cette fois appliquées aux mélanges de pré-aliments. Le modèle est donc libre de fixer le niveau nutritionnel de chaque pré-aliment sans contrainte. En conséquence : il est possible qu'un pré-aliment ne puisse pas être utilisé seul car il ne constitue pas nécessairement un aliment complet et doit être utilisé en association avec un autre pré-aliment pour satisfaire les besoins des animaux.

1.4.2. Autres contraintes

De la même façon, des contraintes minimum et maximum permettent également de maîtriser les taux d'incorporation de matières premières ainsi que de familles de matières premières pour chacun des 38 mélanges de pré-aliments. Le modèle est en revanche libre de fixer la composition en matières premières de chaque pré-aliment sans contrainte.

Les contraintes sur les matières premières et familles de matières premières sont identiques à celles utilisées pour la formulation des aliments AMP-3 et AMP-38. Une contrainte permet de s'assurer que la somme des taux d'incorporation des matières premières est égale à 100 % pour chacun des pré-aliments.

Enfin, des contraintes s'appliquent aux proportions en mélange des différents pré-aliments de sorte que les proportions soient comprises entre 0 % et 100 % et que la somme des proportions des 2 pré-aliments utilisés soit égale à 100 %.

1.4.3. Optimisation

La fonction objectif est, dans ce cas, directement égale au coût alimentaire sur l'ensemble de la période d'élevage. En effet, il ne s'agit pas de minimiser indépendamment le coût de chaque pré-aliment car il faut tenir compte de la quantité utilisée pour chacun des pré-aliments. Le résultat de la formulation est la composition en matières premières de chaque pré-aliment ainsi que les proportions quotidiennes de ces pré-aliments à distribuer. La résolution des problèmes d'optimisation bilinéaire a été obtenue à l'aide du solveur Knitro.

1.5. Calcul des indicateurs économiques et environnementaux

Pour chacune des stratégies, 3 indicateurs ont été calculés afin de statuer sur l'intérêt économique et environnemental de l'alimentation de précision.

1.5.1. Indicateur économique

Le coût alimentaire exprimé en €/poulet permet de comparer l'efficacité économique des différentes stratégies. Pour les stratégies d'alimentation par phases (AMP-3 et AMP-38), il est calculé de la façon suivante : $\sum_{p=1}^n \text{Coût}_p \text{Conso}_p$ avec p la phase, Coût_p le coût de l'aliment de la phase p et Conso_p la quantité d'aliment consommé pendant la phase p . Pour la

stratégie AP-4, il est directement donné par la fonction objectif après optimisation.

1.5.2. Indicateurs environnementaux

L'efficacité environnementale des différentes stratégies a été évaluée à travers deux indicateurs : les rejets d'azote (g/poulet) et les rejets de phosphore (g/poulet). Les rejets sont calculés par différences entre l'ingéré et la rétention. L'ingéré est connu : il s'agit de la composition de l'aliment multiplié par la quantité consommée. La rétention de phosphore est estimée par l'équation suivante : $\sum_{j=1}^{47} GPV_j * 4,68$ avec j, le jour, GPV_j le gain de poids vif au jour j (kg/jour) et 4,68 la composition corporelle en phosphore (g/kg de poids vif) (Khaksarzareha *et al.*, 2017). La rétention d'azote est calculée à partir du dépôt protéique modélisé par allométrie en fonction du poids vif dans le modèle d'estimation des besoins nutritionnels (Méda *et al.*, 2019).

2. RESULTATS

2.1. Résultats de formulation

2.1.1. Stratégie 3 phases

La stratégie 3 phases se traduit par 3 aliments distribués successivement de J10 à J24, de J25 à J42 et de J43 à J47. Les apports nutritionnels sont constants par phase. Compte tenu des choix réalisés pour fixer les contraintes de formulation, les apports sont toujours excédentaires par rapport aux besoins (Figure 2).

2.1.2. Stratégie alimentation de précision 4 pré-aliments

L'optimisation bilinéaire aboutit à 4 formules et un plan d'alimentation quotidien (Figure 3). Comme attendu, les pré-aliments A, B, C et D sont de plus en plus concentrés en EM et de moins en moins concentrés en MAT. Quoique légèrement excédentaires, les apports nutritionnels sont plus proches des besoins qu'avec la stratégie AMP-3 (Figure 2).

2.1.3. Stratégie 38 phases

La stratégie AMP-38 comporte 38 aliments (1 aliment par jour), obtenus par optimisation linéaire. Elle n'est donc pas envisageable sur le terrain pour des raisons logistiques évidentes. Elle permet ici de mesurer l'intérêt de la stratégie AP-4, puisque la stratégie AMP-38 est la plus optimale. En effet, les apports s'ajustent parfaitement aux besoins, chaque jour, et pour l'ensemble des nutriments (Figure 2).

2.2. Evaluation économique et environnementale

Comme espéré, un meilleur ajustement nutritionnel permet une réduction du coût alimentaire de 5,6 % et 6,3 %, en moyenne sur les 4 contextes économiques et par rapport à la stratégie AMP-3, pour les stratégies AP-4 et AMP-38 respectivement (Figure 4). Il permet également en moyenne une réduction des rejets d'azote et de phosphore à raison de 11,4 % (AP-4) et 12,1 % (AMP-38) pour l'azote et 11,3 % (AP-4) et 12,1 % (AMP-38) pour le phosphore (Figure 4).

3. DISCUSSION

3.1. Méthodes de formulation

Avant tout, il faut rappeler que le modèle de formulation bilinéaire est un problème non convexe. Cela signifie que la solution identifiée par le solveur correspond à un minimum local, sans aucun moyen de s'assurer qu'il s'agit du minimum global. Autrement dit, il existe peut-être une solution encore moins coûteuse à ce même problème. Néanmoins, compte tenu des résultats observés, les gains attendus sont suffisamment significatifs pour confirmer l'intérêt de cette stratégie.

Par ailleurs, la stratégie AP-4 implique de considérer la période d'élevage dans son ensemble. En effet, les compositions des pré-aliments sont interdépendantes et dépendent aussi des proportions en mélange. Contrairement à la stratégie AMP-3 pour laquelle chaque aliment peut être formulé indépendamment, il n'est pas possible de « découper » la période d'élevage, ni de revoir les formules en cours de lot.

Enfin, contrairement à ce qui a pu être testé (Hauschild *et al.*, 2015) en alimentation de précision, l'optimum économique semble ne pas être nécessairement obtenu avec des proportions de pré-aliments évoluant de 0 % (resp. 100 %) à 100 % (resp. 0 %). Parallèlement, pour obtenir l'optimum économique, la composition du pré-aliment le plus concentré n'est pas nécessairement égale aux besoins du premier jour de chaque période de distribution. Ceci démontre l'intérêt de cette nouvelle méthode de formulation qui permet de garantir une réduction du coût alimentaire dans le cas d'une stratégie d'alimentation de précision.

3.2. Evaluation économique et environnementale

S'il existe une certaine variabilité liée au contexte économique (Figure 6), les résultats restent suffisamment intéressants pour confirmer l'intérêt de la stratégie AP-4. De plus, les réductions attendues sont très proches de l'optimum obtenu avec la stratégie AMP-38. Ainsi, l'alimentation de précision utilisant successivement 4 pré-aliments en proportions variables, permet d'améliorer les efficacités économiques et environnementales de façon remarquable, avec 1 seule formule supplémentaire par rapport au témoin AMP-3.

3.3. Mise en œuvre de l'alimentation de précision

La mise en pratique de l'alimentation de précision dans les élevages commerciaux suppose certaines adaptations, notamment en termes d'équipements. En effet, cela implique la présence de deux silos pour accueillir simultanément les 2 pré-aliments à mixer, une trémie peseuse-mélangeuse en amont des chaînes de distribution et un outil informatique de gestion automatique des mélanges quotidiens. Ce type d'équipement est déjà utilisé dans des élevages distribuant des céréales entières et un complémentaire mais n'est pas généralisé. Une étude supplémentaire pour évaluer le retour sur investissement permettrait de consolider l'évaluation de l'intérêt de l'alimentation de précision.

En ce qui concerne la distribution, cette stratégie offre l'avantage de ne présenter aucune transition

alimentaire brutale. Néanmoins, elle pose la question du tri par les volailles entre les pré-aliments si leurs présentations devaient être trop différentes. Cependant, la stratégie AP-4, contrairement à une stratégie qui n'utiliserait que 2 pré-aliments, induit des formules relativement proches 2 à 2 sur le plan nutritionnel. De plus, des contraintes sur les taux d'incorporation des matières premières peuvent être ajoutées pour chaque formule afin d'éviter de trop grandes différences de présentation.

Enfin, il est important de noter que le mélange de 2 pré-aliments ne permet pas un ajustement idéal de tous les nutriments. Plus le nombre de pré-aliments utilisé en mélange est important, meilleur est l'ajustement des nutriments. Néanmoins, la stratégie présentée ici limite le nombre de formules et semble donc un bon compromis.

CONCLUSION

La stratégie d'alimentation de précision utilisant 4 pré-aliments permet d'ajuster quotidiennement les

apports nutritionnels aux besoins des poulets sans augmenter le nombre de formules. Ainsi, elle génère des réductions de coût alimentaire (-6 %) et de rejets environnementaux (-11 % d'azote, -4 % de phosphore) prometteuses sans impliquer de changements logistiques importants. Son déploiement sur le terrain suppose néanmoins une modification des équipements en élevage (système de trémie peseuse mélangeuse en amont des chaînes d'alimentation) et donc un certain investissement justifiant que la technique soit préalablement validée en conditions expérimentales.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec les soutiens financiers du programme européen pour la recherche et l'innovation H2020 (projet Feed-a-Gene, n°633531) et du GIS Elevage Demain. Les auteurs remercient également E. Joannopoulos et M. Haddou pour leurs conseils et appui durant le développement du modèle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Hauschild L., Feirrerera Delfim Bueno C., Remus A., De Paula Gobi J., Di Giovanni Isola R., Sakomura N.K., 2015. *Sci. Agric.*, (72), 210-214.
- Khaksarzareha V., Méda B., Narcy A., 2017. *Proc. of the 21th Europ. Symp. on Poult. Nut. (ESPN)*, 124-129.
- Méda B., Talineau M., Chéret C., Narcy A., Dusart L., 2019. 13èmes JRA-JRPFG.
- Pomar C., Hauschild L., Zhang G.-H., Pomar J., Lovatto P. A. 2009. *Rev. Bras. Zootecn.*, (38), 226-237.
- RMT élevage et environnement, 2010. *Guide de bonnes pratiques environnementales d'élevage*, 304p.
- Sauvant D., Perez J.-M., Tran G., 2004. *Tables de compositions et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage*. INRA Editions 301 p.

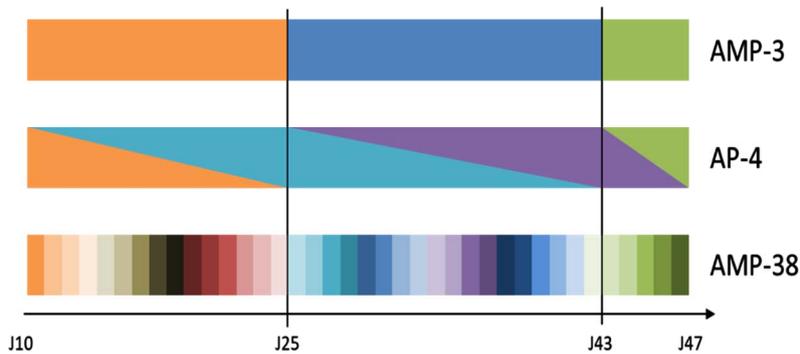


Figure 1. Schématisation des différentes stratégies alimentaires testées.

AMP-3 : Alimentation multiphase 3 phases
 AP-4 : alimentation de précision 4 pré-aliments
 AMP-38 : Alimentation multiphase avec 1 aliment par jour

Figure 2. Evolution des apports nutritionnels pour l'énergie métabolisable (EM), les protéines (MAT) et la lysine digestible (LYSD) par rapport aux besoins dans le cas d'une stratégie 3 phases (AMP-3), 1 aliment par jour (AMP-38) et alimentation de précision avec 4 pré-aliments (AP-4).

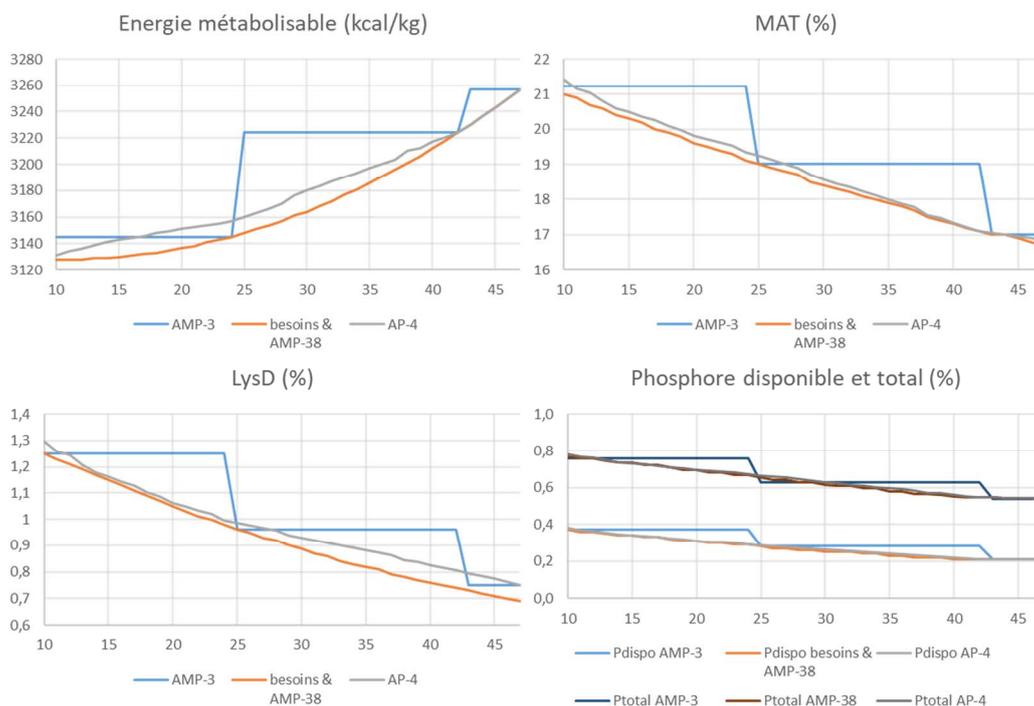


Figure 3. Plan d'alimentation pour la stratégie d'alimentation de précision avec 4 pré-aliments (A, B, C et D), exemple contexte de prix septembre 2011.

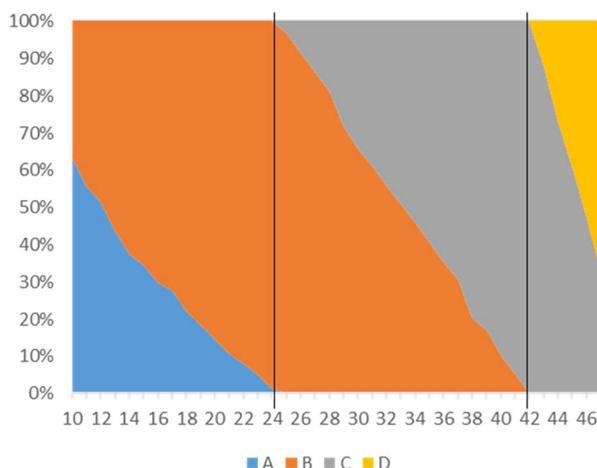


Figure 4. Evolution moyenne des indicateurs économique et environnementaux dans le cas des stratégies alimentation de précision avec 4 pré-aliments (AP-4) et 1 aliment par jour (AMP-38), exprimés par rapport à la stratégie 3 phases (AMP-3). Les barres d'erreur indiquent la variabilité liée au contexte économique.