

Réduction de l'excrétion de phosphore et d'azote chez le porc charcutier par l'ajout d'un objectif environnemental dans l'algorithme traditionnel de formulation

Candido POMAR (1), François DUBEAU (2), Marie-Pierre LETOURNEAU MONTMINY (1), Marina MAHÉ (3), Pierre-Olivier JULIEN (2), Catherine JONDREVILLE (4)

(1) Agriculture et agroalimentaire Canada, C.P 90, Lennoxville, Québec, J1M 1Z3 Canada

(2) Département de Mathématiques et Informatique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1 Canada

(3) INA-PG, 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05

(4) INRA-Unité Mixte de Recherche sur le Veau et le Porc, 35590 Saint-Gilles

Réduction de l'excrétion de phosphore et d'azote chez le porc charcutier par l'ajout d'un objectif environnemental dans l'algorithme traditionnel de formulation

Une méthode multi-objectifs d'optimisation basée sur la méthode traditionnelle de formulation à moindre coût a été développée pour réduire simultanément le prix des aliments et l'azote ou le phosphore excrété par les animaux. La fonction objectif de la méthode modifiée proposée comprend un terme économique et un autre associant un coût aux rejets d'azote (α) ou de phosphore (β). Pour évaluer cette méthode, des aliments destinés aux porcs en croissance (20-65 kg de poids vif) et en finition (65-105 kg) ont été formulés avec deux niveaux de protéine équilibrée (90 et 130 g/kg) et de phosphore disponible (3,2 et 2,6 g/kg) dans deux contextes économiques (français et québécois) pendant 12 mois (juin 2002-mai 2003). La phytase microbienne a été ajoutée à 0, 250, 500 ou 750 unités phytasiques. L'augmentation de α diminue rapidement le taux de protéine brute des aliments sans affecter le niveau de protéine équilibrée. Cette diminution est le résultat d'une amélioration de l'équilibre entre les acides aminés de l'aliment. D'un autre côté, l'augmentation de β contraint à diminuer le P total des formules et le P excrété. Pendant les mois étudiés, des augmentations des coûts des formules de près de 1,5 % en France ou de 1 % au Québec réduisent les rejets de 5 % et plus. Certains mois, la solution économiquement optimale est proche d'une solution produisant beaucoup moins de rejets mais avec un coût légèrement supérieur. La diminution des rejets de P lors de l'augmentation de β est indépendante de l'ajout de phytase microbienne.

Reducing phosphorus and nitrogen excretion in growing-finishing pigs by including an environmental objective in the traditional least-cost formulation algorithm

A multi-objective optimization method based on the traditional least-cost formulation method was developed to reduce the cost and nitrogen or phosphorus excretion in pig diets. The proposed method introduces weighted excesses of dietary nitrogen (α) or phosphorous (β) in the objective function. To evaluate this method, growing-finishing diets were formulated with two balanced protein levels (90 and 130 g/kg) in two economic environments (France and Quebec) during 12 months (June 2002-May 2003). Microbial phytase was added at 0, 250, 500 and 750 phytasic units. Increasing α in the objective function rapidly decreased crude protein content in the formulated diets. The reduction of crude protein content is due to a better amino acid balance between non-weighted and weighted diets. Furthermore, increasing β reduces total P in diets and P excretion. Across the studied months, increases in feed cost around 1.5% in France and around 1% in Québec reduced P excretion by more than 5%. In some months, economically optimal solutions were close to other solutions that cost slightly more but that reduced dramatically the excretion of nutrients. The effect of increasing β on P excretion was independent of the added microbial phytase.

INTRODUCTION

Un des problèmes associés aux surplus d'effluents provenant de l'élevage porcin est leur teneur en minéraux, parmi lesquels le phosphore (P) et l'azote (N) sont les plus préoccupants au Canada (CLUIS et COUTURE, 1987), en France (DOURMAD et al., 1999) et dans d'autres pays (FERNANDEZ et al., 1999 ; VAN DER PEET-SCHWERING et al., 1999 ; POULSEN et al., 1999). La formulation d'aliments minimisant les fractions indigestibles et les apports excédentaires de nutriments est une étape essentielle à la réduction des rejets de nutriments (LE BELLEGO et NOBLET, 2002). En effet, l'azote et le phosphore excrétés proviennent 1) des fractions indigestibles de l'azote et du phosphore alimentaires, 2) des pertes métaboliques obligatoires de ces nutriments, et 3) de la fraction apportée au-delà des besoins des animaux.

La programmation linéaire est sans doute la méthode de formulation plus répandue (PATIENCE et al., 1985). Néanmoins, toutes les méthodes utilisées cherchent à minimiser le coût du mélange, sans tenir compte des conséquences environnementales des excès de nutriments. En fait, une formule peut être adéquate du point de vue nutritionnel et optimale du point de vue économique tout en apportant les nutriments en excès. Lorsque les nutriments en excès sont l'azote ou le phosphore, ou même d'autres minéraux tels que le cuivre ou le zinc, la concentration de ces éléments augmente de façon significative dans le lisier. Malheureusement, la réduction des excès de nutriments dans les aliments est fréquemment perçue comme étant complexe, économiquement coûteuse et ayant un effet néfaste sur la compétitivité des entreprises. Le but de ce travail est donc de développer une méthode d'optimisation multi-objectifs permettant de minimiser simultanément le prix des formules et les rejets d'azote ou de phosphore. Cette méthode est similaire à celle développée pour l'azote (JEAN-DIT-BAILLEUL et al., 1997 et 2001 ; BEAUDOIN et al., 2002). Précisément, les objectifs de ce projet sont de valider les résultats obtenus préalablement, de modifier l'algorithme du simplexe pour qu'il permette aussi de minimiser simultanément le prix des formules et les rejets de phosphore, et d'évaluer les conséquences économiques et environnementales de cette modification.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Le problème nutritionnel

Formuler un aliment complet en production animale implique la détermination d'un mélange d'ingrédients qui satisfait les besoins en nutriments des animaux en accord avec les objectifs de production (PATIENCE et al., 1995). Des étapes importantes de la formulation sont la détermination de la quantité de nutriments que chaque ingrédient rendra disponible pour le métabolisme animal et le niveau de nutriments nécessaire pour que l'animal atteigne le niveau de production souhaité. La programmation linéaire, que nous avons utilisée dans cette étude, implique la détermination du niveau d'incorporation des ingrédients disponibles qui, en respectant une série de contraintes linéaires, minimise (ou maximise)

se) une fonction objective, normalement le prix du mélange. Du point de vue nutritionnel, toutes les méthodes de formulation supposent qu'il n'existe aucune ration idéale par rapport aux ingrédients utilisés. Les ingrédients sont donc sélectionnés par rapport à leur disponibilité, leur composition et leur prix (PATIENCE et al., 1995 ; NRC, 1998). Deux aliments complets sont considérés comme équivalents lorsqu'ils respectent toutes les contraintes imposées.

1.2. La méthode d'optimisation

Le problème traditionnel de formulation d'aliments a été décrit par BERTSIMAS et TSITSIKLIS (1997), IGNACIO et CAVALIER (1994) et par DANTZIG (1990). La méthode proposée est basée sur l'algorithme du simplexe modifié, tel que décrit par JEAN-DIT-BAILLEUL et al. (1997 ; 2001) et BEAUDOIN et al. (2002) pour la réduction des rejets d'azote et par BEAUDOIN et al. (2002) pour la réduction des rejets de phosphore. Autant pour l'azote que pour le phosphore, la fonction objectif comprend un terme économique et un terme tenant compte d'un coût associé aux rejets. Dans les vecteurs, matrices ou pour l'ensemble des résultats présentés dans cet article, les teneurs en nutriments sont exprimées en g/kg d'aliment. Brièvement, soit :

$\vec{x} = (x_i)_{i \in I}$ le vecteur de décision où chaque x_i représente la quantité de l'ingrédient i (par ex. : maïs) de l'ensemble I des ingrédients disponibles.

$A = (a_{ij})_{i \in I, j \in J}$ la matrice des coefficients où chaque a_{ij} représente la quantité du nutriment j (ex. : lysine) dans l'ingrédient i .

$\vec{b} = (b_j)_{j \in J}$ est le vecteur des quantités de nutriments où chaque b_j représente la quantité du nutriment j de l'ensemble J des nutriments devant être dans la formule finale. Ce vecteur définit les besoins nutritionnels des animaux.

$\vec{c} = (c_i)_{i \in I}$ le vecteur où chaque c_i représente le coût unitaire de l'ingrédient i dans la solution finale. Le coût de l'ingrédient inclut son prix sur le marché plus les coûts de transport, de formulation et de mélange.

Le problème traditionnel de formulation peut s'écrire :

$$A\vec{x} = \begin{pmatrix} \sum_{i \in I} a_{i1}x_i \\ \sum_{i \in I} a_{i2}x_i \\ \vdots \\ \sum_{i \in I} a_{iJ}x_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_J \end{pmatrix}$$

en minimisant $C = \sum_{i \in I} c_i x_i$

avec : $\vec{x}_i \geq 0, \forall i \in I$

Dans le système traditionnel, la valeur c_i représente le prix par unité de poids du $i^{\text{ème}}$ ingrédient alors que C est le coût du mélange par unité de poids (dollar canadien, \$/T ; euro, €/T).

Il est possible de modifier la valeur c_i pour que celle-ci inclue aussi un coût additionnel, celui-ci associé à la quantité de phosphore ou d'azote rejetée. Ainsi,

$$c_i = p_i + \alpha r_{1,i}$$

ou

$$c_i = p_i + \beta r_{2,i}$$

où p_i est le prix unitaire de l'ingrédient i par unité de poids, $r_{1,i}$ est la quantité d'azote excrété et $r_{2,i}$ est celle de phosphore due au $i^{\text{ième}}$ ingrédient et α et β sont des coûts associés aux rejets d'azote et de phosphore, respectivement. Dans ce contexte, les valeurs α ou β peuvent être vues comme une taxe sur les rejets, un coût de traitement de ces rejets ou encore comme un coût de transport supplémentaire. Pour plus de détails sur l'intégration de α et β dans le calcul de la fonction objective, voir JEAN-DIT-BAILLEUL et al. (2001) et BEAUDOIN et al. (2002).

Par simplicité, l'azote rejeté est considéré comme étant la différence entre l'azote des protéines brutes ingérées et la somme des besoins en acides aminés exprimés en base digestibilité iléale standardisée, sachant que la teneur moyenne en azote d'une protéine est de 16 % (BOISEN et al, 1987). Le phosphore indisponible est calculé par différence entre le P total ingéré et le P disponible. L'azote et le phosphore excrétés sont considérés comme étant égaux à respectivement l'azote indigestible et le P indisponible. Les rejets réels seront donc supérieurs aux rejets calculés, car ces derniers ne tiennent pas compte des pertes endogènes spécifiques des ingrédients et des pertes liées aux besoins d'entretien.

1.3. Données utilisées

La composition totale et digestible des ingrédients utilisés est celle de l'INRA-AFZ (2002) à l'exception des minéraux et des farines de viande qui proviennent du NRC (1998). Le nombre et le type d'ingrédients sont présentés au tableau 1. Faute de données publiées, les compositions du blé dur, du remoulage de blé dur et du son de blé dur ont été considérées comme similaires à celles respectivement du blé tendre, du remoulage de blé tendre et du son de blé tendre. Les valeurs d'énergie nette ont été estimées (NOBLET et al., 1994). Le pool des acides aminés non essentiels, bruts et digestibles, a été obtenu par soustraction entre le contenu total et la somme des acides aminés essentiels.

Les valeurs de P digestible n'étant pas publiées pour certains ingrédients, le P disponible a été préféré dans cette étude (NRC, 1998 ; FEEDSTUFFS, 2002). Les teneurs en P disponible du gluten feed de blé, du pois, de la graine de soja extrudée et de la pulpe de betterave n'étant pas indiquées, elles ont été déterminées comme suit :

$$P \text{ disponible} = (100 - \% P \text{ phytique}) * P \text{ total} / 100.$$

On a supposé ainsi que le P phytique n'est pas disponible pour l'animal. L'accroissement du P disponible résultant de l'ajout de 250, 500 ou 750 unités phytasiques (UP) de phytase microbienne a été estimé pour chaque matière première à 13,0, 19,7 ou 23,2 % de sa teneur en P digestible (INRA-AFZ, 2002 ; KORNEGAY, 2001).

Tableau 1 - Nombre et type d'ingrédients utilisés

	France	Québec
Nombre d'ingrédients	23	18
Céréales	4	4
Légumineux	1	
Tourteaux d'oléagineux	4	2
Huiles	2	
Sous produits végétaux	5	2
Sous produits animaux		3
Minéraux	3	3
Acides aminés de synthèse	4	4

Les besoins des porcs ont été définis pour la phase de croissance (de 20 à 65 kg de poids vif) et de finition (de 65 à 105 kg de poids vif) selon le NRC (1998), à l'exception du celui du P disponible qui a été estimé à partir des travaux de EKPE et al. (2002) et FENT et al. (2003). Les valeurs utilisées sont comparables à celles utilisées par l'industrie (M. ROY, communication personnelle ; D. GUILLOU, communication personnelle).

Les prix des ingrédients utilisés dans cette étude sont ceux enregistrés au début de chaque mois entre juin 2002 et mai 2003 par des collaborateurs de l'industrie québécoise (Coopérative Fédérée de Québec, Montréal) et française (INZO, Château-Thierry). Les prix de la Méthionine Hydroxy-Analogue et du L-Tryptophane ont été évalués à partir de données publiées (AFZ et CEREOPA, 2003). Des contraintes d'ordre technologiques, d'appétence et de qualité des ingrédients ont été fournies par chacun des collaborateurs.

1.4. Évaluation de la méthode proposée

Des formules optimales pour les porcs en croissance et en finition ont été obtenues dans chacun des deux contextes économiques et pour chacun des mois étudiés. Dans tous les cas, un prémix contenant les vitamines et oligo-éléments a été imposé à une teneur fixe de 5 kg/T. La consommation des porcs pour les deux phases d'engraissement a été estimée respectivement à 80 et 140 kg/porc. Pour chaque formule, 32 contraintes ont été imposées, dont 13 concernaient les acides aminés. Les formules ont été obtenues avec l'outil Solver (ver. SP-2, Excel, Microsoft, USA).

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Réduction de l'excrétion d'azote

Comme observé par JEAN-DIT-BAILLEUL et al. (2001), l'augmentation du coût associé aux rejets azotés (α) entraîne une diminution de l'azote excrété mais une augmentation du coût de la ration. Cette diminution des rejets est la conséquence d'une diminution de la teneur en protéines brutes des aliments, le niveau de protéine idéale restant constant. Toutefois, la suppression des farines animales et la baisse du prix des céréales en France sont à l'origine de quelques différences entre l'étude de 2001 et l'actuelle. Ainsi, dans cette étude du contexte français (2002-2003) la plage de varia-

tion de la teneur en protéines brutes des régimes pour $\alpha=0$ est plus faible, soit 12 g/kg d'aliment pour la phase de croissance et 19 g/kg d'aliment pour la phase de finition, comparativement à 59 g/kg pour la phase de croissance et 62 g/kg pour la phase de finition dans l'étude de 2001 (contexte français de 1995). Cette moindre variation du taux de protéines brutes est due à une plus grande stabilité des prix entre céréales et matières premières riches en azote. Pour une augmentation équivalente du coût associé au rejet (de 0 à 0,03 €/g d'azote excrété ou 0,046 \$ canadien/g d'azote excrété), le pourcentage de diminution du rejet d'azote est plus élevé pour le Québec que pour la France. Ces valeurs obtenues dans le contexte québécois s'expliquent par un taux en protéines brutes des rations plus élevé. D'autre part, l'étude de JEAN-DIT-BAILLEUL et al. (2001) comportait un nombre de matières premières apportant de l'azote (42) supérieur à celui de notre étude (18), ce qui peut également expliquer certaines des différences observées.

2.2. Réduction de l'excrétion de phosphore

Pour faciliter leur interprétation, les résultats concernant le mois d'avril 2003 dans le contexte économique français sont présentés avant les résultats de l'ensemble des 12 mois étudiés.

2.2.1. Mois d'avril 2003 en France

Pendant le mois d'avril 2003 en France l'augmentation de β entraîne une diminution du phosphore total ingéré et une réduction du P indisponible et, par conséquent, du P excrété (figure 1). Néanmoins, indépendamment de la valeur de β , le phosphore disponible apporté par les aliments est égal aux besoins. Lorsque β augmente la diminution du P total et l'augmentation du coût des aliments se fait de façon échelonnée. Par exemple, pour les aliments de la phase de croissance, la valeur de β doit augmenter jusqu'à 0,0011 €/kg de P indisponible pour que la solution optimale change. La nouvelle solution contient moins de P total (-11,1 %) mais elle coûte plus cher (+0,46 %). Ensuite, β , et, parallèlement, le coût de la formule, doivent augmenter de façon importante pour que le P alimentaire soit réduit de façon significative.

Le P indisponible est un bon indicateur du P excrété lorsque les animaux sont alimentés avec des niveaux de P disponible proches des besoins. Ainsi, la relation entre l'augmentation du coût de l'alimentation (ou de l'augmentation du coût du mélange) et la réduction du P excrété (ou de la réduction du P indisponible de l'aliment) montre que, en croissance comme en finition, des réductions des rejets de P de plus de 25 % auraient pu être obtenues avec des augmentations du coût des aliments de moins de 0,7 % (figure 2). Ensuite, l'augmentation de β ne conduit pas à des réductions importantes des rejets de P. En 1995, lorsque nous avons étudié les rejets d'azote, nous avons observé que, selon le coût des matières premières, il était possible de réduire les rejets sans augmenter de façon importante le coût de l'aliment pour certains mois (JEAN-DIT-BAILLEUL et al., 2001). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus avec le P, mais la relation entre le coût des aliments et la réduction de la teneur en P total, ou de façon équivalente des rejets de P, est étroitement liée au prix des matières premières.

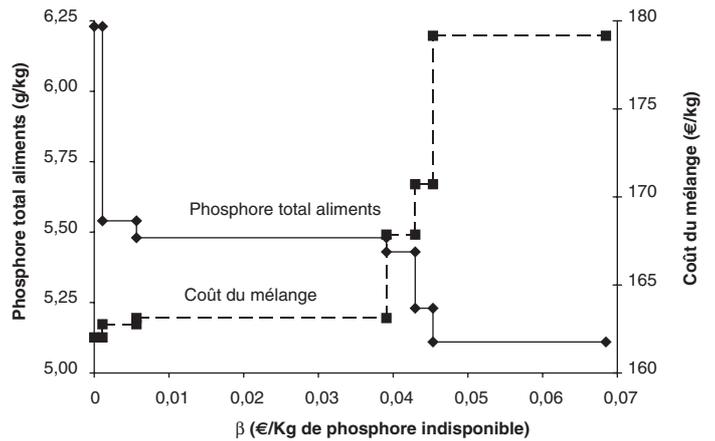


Tableau 2 - Effet du coût associé aux rejets de phosphore (β) sur les paramètres économiques et nutritionnels du mois d'avril 2003 en France

	Objectif de la formulation ¹					
	Économique $\beta=0$		Intermédiaire $\beta=0,04$		Environnemental $\beta=\infty$	
P total ingéré (kg/porc)	1,25		1,07		0,88	
P indisponible ingéré (kg/porc) ²	0,63		0,45		0,25	
Coût d'alimentation (€/porc)	32,90		33,4		135,05	
	Phases d'alimentation ³					
	1		2		1	
P total des aliments (g/kg)	6,23	5,35	5,43	4,52	4,59	3,65
P disponible des aliments (g/kg)	3,20	2,60	3,20	2,60	3,20	2,60
Coût de la formule (€/T)	162,0	142,4	165,2	144,15	538,14	657,15
P indisponible (g/kg) ³	3,03	2,75	2,23	1,92	1,39	1,05
P indisponible ingéré (kg/porc)	0,24	0,39	0,18	0,27	0,11	0,15
Nombre de matières premières	12	13	14	13	13	13

¹ $\beta = 0$: équivalent à la méthode de formulation traditionnelle minimisant le coût du mélange

$\beta = 0,04$: objectif intermédiaire correspondant à 5 % d'augmentation du coût du mélange

$\beta = \infty$: formule minimisant les rejets de phosphore, indépendamment du prix des ingrédients

²calculé par différence entre le P total ingéré et les besoins en P disponible ; voir Matériel et Méthodes pour plus de détail

³ 1 = croissance, de 20 à 65 kg ; aliment ingéré : 80 kg ;

2 = finition : de 65 à 105 kg de poids vif ; aliment ingéré : 140 kg

De façon générale, plus le P des matières premières est disponible, plus leur intérêt dans la formule augmente lorsque β augmente. Par exemple, l'orge (P disponible/P total=0,30) remplace avantageusement le maïs (P disponible/P total=0,14). Cependant, en raison de leur faible apport en d'autres nutriments disponibles que le P, les remoulages de blé ne sont pas sensibles à une augmentation de β , en dépit de la disponibilité élevée du P qu'ils contiennent. Enfin, l'abaissement du taux d'incorporation des tourteaux en faveur des acides aminés industriels permet de diminuer l'apport de P indisponible.

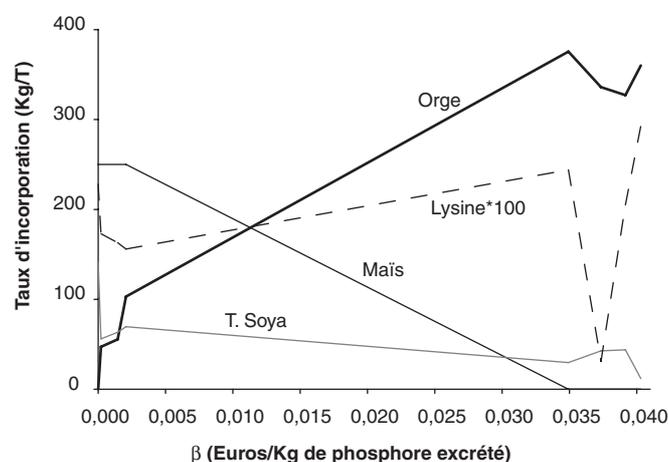


Figure 3 - Niveau d'incorporation des ingrédients des mélanges de finition obtenus pour le mois d'avril 2003 en France lors de l'augmentation du coût associé aux rejets (β)

2.2.2. De juin 2002 à mai 2003 en France

Pour tous les mois étudiés, l'augmentation du coût associé aux rejets de P (β) force la méthode du simplexe à diminuer le P total des formules, tout en respectant les niveaux minimaux de P disponible (tableau 3). Ainsi, pour des changements de β de 0 à 0,04 €/kg P excrété, la réduction moyenne du P total des formules destinées aux porcs en croissance est de 5,42 % et de 6,45 % pour celles des porcs en finition. Pendant les 12 mois d'étude, le P total des aliments formulés à moindre coût ($\beta=0$) et destinés aux porcs en croissance a varié de 4,9 % pendant que cette variation était de 6,9 % pour les aliments de finition. Lorsque que $\beta=0,04$, ces variations en P total ont diminué de 1,6 et 1,1 %, respectivement. Cette variation était encore plus faible pour des valeurs plus élevées de β . Néanmoins, le niveau de réduction du P total obtenu avec des augmentations de β est dépendant du prix des matières premières. En effet, des réductions de 17 et 22 % ont été observées pour le mois de mai 2003 lorsque β passait de 0 à 0,04, alors que pour ce même changement de β , la réduction n'était que de 2-3 % pour les mois de décembre et janvier. En fait, les niveaux de P total des aliments formulés pour les mois d'avril et mai 2003 étaient plus élevés que ceux des autres mois étudiés, suite à l'entrée dans la formule de plus de co-produits du blé. Cet effet de la valeur de β sur la réduction de la fraction indisponible du P alimentaire est mise en évidence par le fait que les pentes correspondantes à la diminution du P indisponible avec l'accroissement du coût des formules sont similaires à celles des autres mois après des augmentations des coûts de 1,5 % (figure 4). Quoique les mois d'avril et mai aient été les plus

affectés par les valeurs de β , une diminution de plus de 5 % de la fraction indisponible du P alimentaire entraîne une augmentation du coût des formules de moins de 2 %.

Pour l'entière période d'engraissement, la quantité de phosphore total ingéré diminue de 0,07 kg/porc, soit de 6,1 %, lorsque β augmente de 0 à 0,04, ce qui correspond à une augmentation du coût d'alimentation de 1,0 €/porc, soit de 3,1 %. Pour $\beta=+\infty$, le P total excrété diminue de 46 % mais à des coûts très élevés. Pour chacune des deux phases d'engraissement, le rapport P disponible/P total augmente avec β . Ainsi, lorsque β augmente de 0 à 0,04, ce rapport augmente de 0,56 à 0,59 et de 0,53 à 0,57 respectivement pour les périodes de croissance et de finition (tableau 4). À la limite ($\beta=+\infty$), ces rapports sont de 0,70 et 0,71 pour chacune de ces phases d'alimentation. Il est à noter que les variations entre les mois pour toutes ces valeurs diminuent avec l'augmentation de β . En fait, pour la méthode de formulation traditionnelle (moindre coût, soit $\beta=0$) la solution optimale est fonction du prix des ingrédients et de leur teneur en nutriments. Au contraire, plus la valeur de β augmente, plus le mélange optimal est déterminé par la composition nutritionnelle des ingrédients et est indépendant de leur prix.

2.2.3. Comparaison des résultats obtenus en France avec ceux du Québec

Le contexte économique est très déterminant de l'effet plus ou moins marqué de β sur la diminution des rejets. Ainsi, lorsque

le coût des matières riches en phosphore est faible, les possibilités de réduction du P indisponible sont plus importantes (par ex. : avril 2003). Dans le contexte québécois, la diminution du P indisponible est relativement plus marquée qu'en France, pour les mois autres qu'avril et mai 2003 (figure 5). Comme pour le contexte français, des augmentations du coût des formules de 1 % s'accompagnent de réductions des rejets de P de près de 5 %. Les différences entre les deux contextes

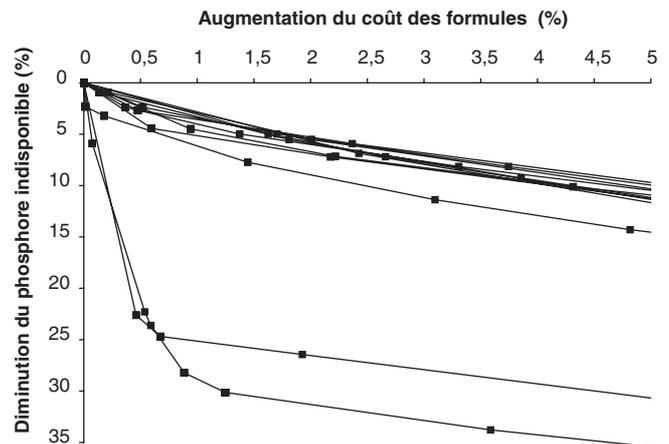


Figure 4 - Relation entre l'augmentation du coût du mélange et la diminution du phosphore indisponible obtenue avec l'augmentation du coût associé aux rejets (β) en France de juin 2002 à mai 2003

Tableau 3 - Phosphore total des formules (g/kg) optimisés pour les deux phases d'alimentation selon un objectif économique ($\beta = 0$) et intermédiaire ($\beta = 0,04$) en France entre les mois de juin 2002 et mai 2003

Mois	Phase 1 d'alimentation ¹			Phase 2 d'alimentation		
	Objectif de la formulation ²		Réduction (%)	Objectif de la formulation		
	Économique $\beta=0$	Intermédiaire $\beta=0,04$		Économique $\beta=0$	Intermédiaire $\beta=0,04$	Réduction (%)
Juin	5,60	5,43	3,08	4,75	4,56	3,96
Juillet	5,71	5,18	9,39	4,86	4,51	7,32
Août	5,53	5,36	3,03	4,71	4,52	3,89
Septembre	5,51	5,34	3,00	4,67	4,43	3,65
Octobre	5,63	5,36	4,92	4,82	4,51	6,40
Novembre	5,58	5,36	3,95	4,73	4,53	4,17
Décembre	5,58	5,45	2,36	4,73	4,62	2,19
Janvier	5,60	5,48	2,13	4,75	4,58	3,56
Février	5,60	5,48	2,13	4,75	4,58	3,56
Mars	5,54	5,48	1,13	4,65	4,58	1,41
Avril	6,23	5,43	12,86	5,35	4,52	15,46
Mai	6,35	5,39	17,06	5,77	4,51	21,78
Moyenne	5,71	5,40	5,42	4,88	4,54	6,45
Écart-type	0,279	0,085	5,004	0,336	0,050	6,053
CV (%)	4,89	1,58	92,33	6,88	1,10	93,90

¹ 1 = croissance, de 20 à 65 kg ; aliment ingéré : 80 kg ;

² 2 = finition : de 65 à 105 kg de poids vif ; aliment ingéré : 140 kg

$\beta = 0$: équivalent à la méthode de formulation traditionnelle minimisant le coût du mélange

$\beta = 0,04$: objectif intermédiaire correspondant à 5% d'augmentation du coût du mélange

Tableau 4 - Effet du coût associé aux rejets de phosphore (β) sur les paramètres économiques et nutritionnels obtenu entre les mois de juin 2002 et mai 2003 en France

	Objectif de la formulation ^{1,2}					
	Économique $\beta=0$		Intermédiaire $\beta=0,04$		Environnemental $\beta=\infty$	
P total ingéré (kg/porc)	1,14±0,07		1,07±0,01		0,88±0,04	
P indisponible ingéré (kg/porc) ³	0,56±0,07		0,49±0,01		0,30±0,04	
Coût d'alimentation (€/porc)	32,71±0,58		33,71±0,60		136,6±12,81	
	Phases d'alimentation ⁴					
	1		2		1	
P total des aliments (g/kg)	5,72±0,30	4,88±0,34	5,39±0,09	4,54±0,04	4,58±0,01	3,66±0,28
P disponible des aliments (g/kg)	3,2	2,60	3,2	2,60	3,2	2,60
Coût de la formule (€/T)	162,44±0,004	140,82±0,003	167,43±0,003	145,10±0,002	561,48±0,036	654,81±0,071
P indisponible (g/kg) ³	2,52±0,3	2,28±0,34	2,19±0,09	1,94±0,04	1,38±0,01	1,06±0,28
P indisponible ingéré (kg/porc)	0,20±0,02	0,32±0,05	0,18±0,07	0,27±0,05	0,11±0,001	0,15±0,04
Nombre de matières premières	12,3±0,62	12,8±0,72	12,8±0,98	13,5±0,8	12,6±0,51	12,1±0,29

¹ $\beta = 0$: équivalent à la méthode de formulation traditionnelle minimisant le coût du mélange

$\beta = 0,04$: objectif intermédiaire correspondant à 5 % d'augmentation du coût du mélange

$\beta = \infty$: formule minimisant les rejets de phosphore, indépendamment du prix des ingrédients

² moyenne±écart type

³ calculé par différence entre le P total ingéré et les besoins en P disponible ; voir Matériel et Méthodes pour plus de détail

⁴ 1 = croissance, de 20 à 65 kg ; aliment ingéré : 80 kg

2 = finition : de 65 à 105 kg de poids vif ; aliment ingéré : 140 kg

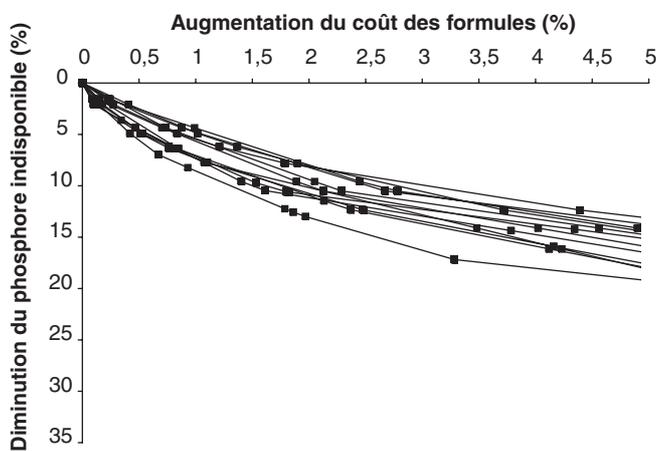


Figure 5 - Évolution du phosphore total des aliments en fonction de coût associé aux rejets de phosphore (β) et à la dose de phytase microbienne ajoutée aux aliments de croissance du mois de juin 2002 au Québec

économiques étudiés peuvent s'expliquer par le nombre d'ingrédients disponibles, leur prix, la disponibilité des farines d'origine animale et la qualité des ingrédients.

La nature des matières premières utilisées dans les rations, plus que leur nombre, facilite la diminution des rejets de P lorsque la valeur de β augmente. Ainsi, 50 % et plus du phosphore du blé, du pois, du corn gluten feed, des farines de viandes de la pulpe de betterave et du phosphore minéral sont sous forme disponible. Les farines de viande ne sont pas

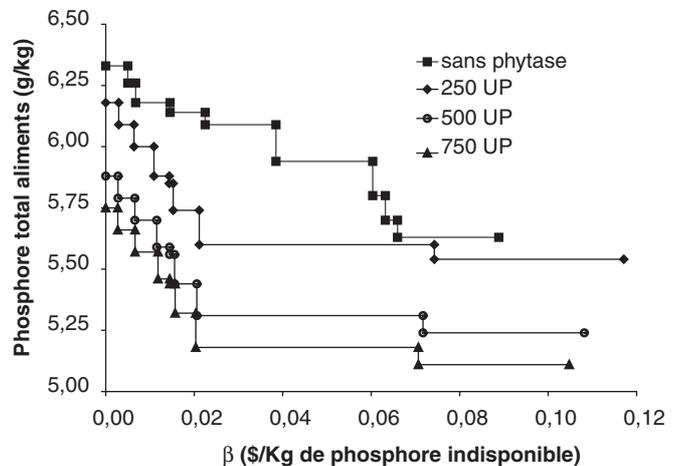


Figure 6 - Évolution du phosphore total des aliments en fonction de coût associé aux rejets de phosphore (β) et de la dose de phytase microbienne ajoutée aux aliments de croissance du mois de juin 2002 au Québec

utilisées en France et le blé est un ingrédient peu utilisé au Québec. De plus, la farine de viande est riche en phosphore ainsi qu'en protéines et minéraux et sa suppression de l'alimentation animale semble limiter la réduction des rejets de P en France. Le nombre de contraintes imposées lors de la détermination de la formule optimale est en général une limite à l'obtention de formules moins chères ainsi qu'à la diminution des rejets de P. Ainsi, certaines restrictions sur l'utilisation de certaines céréales (avoine, orge, maïs...) ajoutent encore à la difficulté de réduire les rejets de P dans le contexte français.

2.2.4. Effet de l'ajout de phytase

L'effet combiné d'un ajout de 250, 500 ou 750 UP de phytase microbienne et d'un accroissement de β sur le coût des formules et la réduction des rejets de P a été étudié dans le contexte québécois de production. Par simplicité, seuls les résultats du mois de juin 2002 sont présentés. Des ajouts de phytase de 250, 500 et 750 UP ont permis de diminuer le P total des aliments et le P total ingéré de respectivement 2,4, 7,1 et 9,2 %, par rapport à un aliment sans phytase (figure 6). L'ajout de la contrainte environnementale β permet de réduire davantage le niveau de P des aliments et ceci indépendamment du niveau d'ajout de phytase.

CONCLUSION

La méthode utilisée s'est avérée efficace pour diminuer l'excrétion d'azote et de phosphore dans le lisier, tout en maintenant le coût des formules à un niveau acceptable. Ainsi pour le P, dans les deux contextes économiques étudiés, des augmentations des coûts des formules de près de 1,5 % en France ou de 1 % au Québec réduisent les rejets d'au moins 5 % pour l'ensemble des mois étudiés. Néanmoins,

ces résultats montrent que, pour plusieurs mois, la solution économiquement optimale est très près d'une solution plus acceptable du point de vue environnemental. Dans ces cas, des réductions importantes des rejets de P peuvent être obtenus avec des augmentations du coût des aliments relativement faibles. La diminution des rejets de P lors de l'application de la méthode proposée est indépendante de l'ajout de phytase. Cette méthode serait simple à intégrer dans les pratiques de formulation actuelles puisqu'elle utilise le même algorithme de formulation. L'avantage de cette méthode réside dans le fait que l'utilisateur est en mesure de décider jusqu'à quel niveau il veut diminuer les rejets ou quel est le prix qu'il est prêt à payer pour une réduction éventuelle des rejets, et ceci en fonction du prix des matières premières disponibles.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient David GUILLOU d'INZO, Marquis ROY et Yan MARTEL-KENNES et Marie-Claude AUMONT de la Coopérative Fédérée de Québec pour leur avoir fourni les données utilisées dans ce projet et pour les nombreuses suggestions concernant les formulations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFZ, CEREOPA, 2003. Données économiques et techniques en alimentation animale. Disponible : www.feedbase.com.
- BEAUDOIN, I., DUBEAU F., POMAR C., 2002. Computational Mathematics and Modeling CMM, May 2002, Bangkok, Thailand, a special volume published by the East-West Journal of Mathematics, 197-206.
- BERTSIMAS, D., TSITSIKLIS, J., 1997. Introduction to Linear Optimization. Athena Scientific, Belmont, MA.
- BOISEN S., BECH-ANDERSEN, S., EGGUM, B.O., 1987. Acta Agric. Scand., 37, 299-304.
- CLUIS D., COUTURE P., 1987. Sci. Techn. l'Eau 20, 311-317.
- DANTZIG, G.B., 1990. Interfaces 20, 43-47.
- DOURMAD J.Y., GUINGAND N., LATIMIER P., SEVE B., 1999. Livest. Prod. Sci., 58, 199-211.
- EKPE E.D., ZIJLSTRA R.T., PATIENCE J.F., 2002. Can. J. Anim. Sci., 82, 541-549.
- FEEDSTUFFS, 2002. Reference issue & Buyers guide : A complete reference and resource guide for the feed and feeding industries, 74, 28
- FENT R.W., ALLEE G.L., WEBEL D.M., SPENCER J.D., GAINES A.M., KENDALL D.C., FRANK J.W., 2003. J. Anim. Sci., 81 (Suppl. 1), 98 (Abstract).
- FERNANDEZ J.A., POULSEN H.D., BOISEN S., ROM H.B., 1999. Livest. Prod. Sci., 58, 225-242.
- IGNACIO J.P., CAVALIER T.M., 1994. Linear Programming. Prentice. Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- INRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. SAUVANT D., PEREZ J.M., TRAN G. Coord., INRA Eds, Paris, 291p.
- JEAN-DIT-BAILLEUL P., RIVEST J., POMAR C., 1997. Journées Rech. Porcine en France, 29, 299-304.
- JEAN-DIT-BAILLEUL P., J. RIVEST F. DUBEAU C., POMAR. 2001. Livest. Prod. Sci., 72, 199-211.
- JONGBLOED A.W., MROZ Z., VAN DER WEIJ-JONGBLOED R., KEMME P.A., 2000. Livest. Prod. Sci., 67, 113-122.
- KORNEGAY E.T., 2001, p237-271 in Enzymes in Farm Animal Nutrition. M.R. Bedford and G.G. Partridge eds. CAB International, Wallingford, Oxon, UK.
- LE BELLEGO L., NOBLET J., 2002. Livest. Prod. Sci., 76, 45-58.
- NOBLET J., FORTUNE H., SHI X.S., DUBOIS S., 1994. J. Anim. Sci., 72, 344-354.
- NRC. 1998. Nutrient Requirements of Swine. (10th ed.) National Academy Press, Washington, DC.
- PATIENCE J.F., THACKER P.A., DE LANGE C.F.M., 1995. Swine Nutrition Guide, 2nd Edition. University of Saskatchewan, Prairie Swine Center, Saskatoon.
- POULSEN H.D., JONGBLOED A.W., LATIMIER P., FERNANDEZ J.A., 1999. Livest. Prod. Sci., 58, 251-259.
- VAN DER PEET-SCHWERING C.M.C., JONGBLOED A.W., AARNINK A.J.A., 1999. Livest. Prod. Sci., 58, 213-224.