

Réduction de l'excrétion d'azote chez le porc en croissance par l'ajout d'un objectif environnemental dans l'algorithme traditionnel de formulation

P. JEAN dit BAILLEUL, J. RIVEST, C. POMAR

*Agriculture et Agro-alimentaire Canada, Centre de Recherche et de Développement sur le Bovin Laitier et le Porc.
Station de Recherches - CP 90, 2000 route 108 Est, Lennoxville, Québec, J1M 1Z3, Canada*

*avec la collaboration de Techna Nutrition Animale, BP 10 - 44220 Couëron
et de Génétiporc, BP12, St Bernard, Beauce - Québec, G0S 2G0, Canada*

Réduction de l'excrétion d'azote chez le porc en croissance par l'ajout d'un objectif environnemental dans l'algorithme traditionnel de formulation

Le but de ce travail était donc de développer une méthode d'optimisation multi-objectif permettant de minimiser simultanément le prix des formules et les rejets d'azote puis d'en évaluer les conséquences économiques et environnementales. Pour tester cet objectif, nous avons optimisé 2 160 formules correspondant à 2 environnements économiques (France et Québec), 12 mois (janvier - décembre 1995), 3 teneurs en protéine équilibrée dans les aliments (90, 110 et 130 g/kg), 2 systèmes d'énergie (EN et ED) et 15 niveaux de coût sur les rejets d'azote.

Dans un premier temps, le taux de protéine diminue fortement lorsque le coût des rejets d'azote augmente, puis cette évolution se ralentit fortement. La diminution du taux de protéine est essentiellement liée à l'amélioration de l'équilibre entre les acides aminés de la protéine digestible (elle passe de 70-80 % à plus de 95 %). Cette amélioration de l'équilibre est obtenue par une augmentation du nombre de matières premières utilisées dans la solution optimale liée principalement à l'augmentation du nombre de céréales et de leurs sous-produits et à l'utilisation des acides aminés de synthèse. On observe également une diminution du nombre de matières premières riches en protéines. Enfin, l'augmentation de prix est relativement faible comparée à la diminution du taux de protéine. Pour un porc maigre, en France et pendant l'année 1995, la réduction de la consommation de protéine aurait pu être de 22,6 % pour une augmentation du prix de 3 %. Des résultats comparables ont été obtenus au Québec.

Reducing nitrogen in growing pig excretion by including the environmental objective into the traditional optimization system

The objective of this study was to develop a multi-objective optimization method allowing to reduce both energy and nitrogen excretion in pigs diets and to evaluate the effects of this method on feeding cost and nitrogen excretion. To evaluate this method, we have formulated 2,160 diets corresponding to 2 economical environments (France and Quebec), 12 months (January - December 1995), 3 balanced protein levels (90, 110 and 130), two energy systems (NE and DE) and 15 levels of the associated cost of nitrogen excretion.

The crude protein content of the diets was reduced rapidly at the beginning and more slowly afterwards. The reduction of crude protein content is due to a better balance between amino acid (95% versus 70-80%). This better equilibrium is obtained by using more feedstuff in the optimal diet, essentially cereals and their by-products, and by the use of synthetic amino acids. There is also a decrease in the use of feeds rich in protein. The increase in price is relatively low compared to the reduction of the crude protein content. In feeding lean pigs during 1995 in France, the reduction of protein intake could have been of 22.6% with an increase in feeding cost of only 3%. Similar results have been obtained in Quebec.

INTRODUCTION

La production porcine a changé de façon importante au cours des 20 dernières années. Ainsi, au début du siècle, les unités de production étaient de petite taille et leur but principal était de satisfaire les besoins familiaux en viande. A partir des années 70, la production porcine s'est intensifiée avec une diminution du nombre total de fermes et une augmentation de la productivité et de la taille des entreprises. Malheureusement, cette intensification s'est accompagnée d'une concentration de la production dans certaines régions où la surface n'est plus suffisante pour permettre la complémentarité traditionnelle entre les productions animales et végétales. Ainsi, le lisier, traditionnellement considéré comme fertilisant, est épandu en quantités excessives et devient alors un polluant des sols et des eaux de nos rivières. Cette situation a atteint des niveaux dramatiques dans certaines régions européennes (Bretagne en France, ouest de la Belgique et sud-est des Pays-Bas) et Canadiennes (Assomption, Chaudière et Yamaska au Québec) (CLUIS et COUTURE, 1987). Parmi les constituants du lisier, l'azote et le phosphore sont considérés comme étant les plus polluants.

De nombreux travaux ont montré la possibilité de réduire la pollution azotée par une meilleure utilisation du lisier et/ou par l'amélioration de la qualité de la protéine par un aliment adapté aux besoins des animaux (POMAR et BARNET, 1994). En fait, l'excrétion dépend de la quantité d'azote ingérée, de la digestibilité et de l'utilisation de l'azote par l'animal. La protéine non digestible est excrétée dans les fèces tandis que l'azote digestible mais non retenu par l'animal se retrouve dans l'urine.

La qualité d'une protéine est définie par la digestibilité de ses acides aminés, par leur disponibilité métabolique ainsi que par leur capacité à satisfaire les besoins de l'animal. Ces derniers sont principalement définis par les apports relatifs des acides aminés. Les fractions non digestible, non disponible pour le métabolisme, non équilibrée et celle en excès ne peuvent être utilisées par l'animal et par conséquent, elles peuvent être réduites sans affecter sa croissance (TAYLOR et al., 1979 ; BATTERHAM et al., 1990 ; SPIEKERS et al., 1993, VALAJA et al., 1993).

La formulation consiste à déterminer un mélange de matières premières qui permette de satisfaire les besoins en nutriments des animaux en accord avec les objectifs de production. Plusieurs méthodes servent à la formulation de rations parmi lesquelles la programmation linéaire est indubitablement la plus répandue. (PATIENCE et THACKER, 1989). Néanmoins, toutes ces méthodes optimisent le mélange d'ingrédients avec le seul objectif de minimiser le coût économique du mélange. Ce type d'optimisation ne tient compte ni des conséquences environnementales ni des coûts relatifs d'un meilleur équilibre d'acides aminés. En fait, une formule peut être adéquate du point de vue nutritionnel et optimale du point de vue économique tout en ayant un apport protéique excessif et, par conséquent, être dommageable pour l'environnement. Le respect des

contraintes environnementales est perçu fréquemment comme étant complexe, économiquement coûteux et ayant un effet néfaste sur la compétitivité des entreprises. Le but de ce travail était donc de développer une méthode d'optimisation multi-objectif permettant de minimiser simultanément le prix des formules et les rejets d'azote puis d'en évaluer les conséquences économiques et environnementales.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODE

1.1. Méthode d'optimisation

La méthode proposée est basée sur l'algorithme du simplexe dans laquelle, la fonction objectif comprend un terme économique et un terme tenant compte du coût environnemental.

Soit :

- $\bar{x} = (x_i)_{i \in I}$ le vecteur de décision où chaque x_i représente la quantité de la matière première i de l'ensemble I des matières premières disponibles.
- $\bar{A} = (a_{ij})_{i \in I, j \in J}$ la matrice des coefficients du système où chaque a_{ij} représente la quantité du nutriment j dans la matière première i .
- $\bar{b} = (b_j)_{j \in J}$ 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.
- $\bar{c} = (c_i)_{i \in I}$ le critère de choix où chaque c_i représente l'intérêt à inclure la matière première i dans la solution finale.

Le problème peut alors s'écrire :

$$Ax = \begin{pmatrix} \sum_{i \in I} a_{i1} x_i \\ \sum_{i \in I} a_{i2} x_i \\ \vdots \\ \sum_{i \in I} a_{ij} x_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_j \end{pmatrix}$$

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

Avec : $x \geq 0$

Dans le système traditionnel, la valeur c_i représente le prix par unité de poids de la $i^{\text{ème}}$ matière première alors que C est le coût du mélange par unité de poids. Dans la méthode proposée, la valeur c_i est fonction du prix et de la quantité d'azote rejetée, c'est-à-dire, $c_i = p_i + \beta r_i$ où p_i est le prix de la matière première i par unité de poids, la quantité d'azote rejetée due à la $i^{\text{ème}}$ matière première et β une constante représentant le coût associé du rejet d'azote pouvant être une taxe sur les rejets d'azote, un coût de traitement de ces rejets ou encore un coût de transport de la charge polluante supplémentaire.

L'algorithme du simplexe a été adapté de celui proposé par BUNDAY et al. (1987) et programmé en Microsoft[®] Visual Basic[®] version 3.0 pour Windows[®].

1.2. Données utilisées

Les deux banques de prix de matières premières utilisées dans ce travail ont été fournies par deux entreprises, l'une Québécoise et l'autre Française. La composition des matières premières est issue dans les deux cas de la table des matières premières proposée par l'INRA (1989). Dans ces banques de données, les matières premières sont définies par leur prix, les teneurs énergétiques (ED et EN), les quantités de nutriments et leurs digestibilités. Les valeurs d'EN ont été fournies par les deux compagnies qui les ont calculées à partir des travaux de NOBLET et al (1989). Les digestibilités de la protéine et des acides aminés ont été calculées d'après les estimations de digestibilité iléale apparente proposées par RPNA (1993). Les prix des matières premières étaient ceux enregistrés par chaque compagnie au début de chaque mois entre janvier et décembre 1995. Le nombre de matières premières, en plus du prémix, était de 84 (France) et 19 (Québec) parmi lesquelles, 44 et 11 étaient respectivement des sources de protéines. Les deux entreprises disposaient de lysine, de thréonine, de méthionine et de tryptophane de synthèse.

1.3. Formulation

Pour tester la méthode d'optimisation proposée, des optimisations de formules, adaptées à trois stades de la croissance des porcs charcutiers, ont été effectuées. Dans tous les cas, un prémix, sans aucune valeur nutritionnelle sauf pour les vitamines et oligo-éléments, a été imposé à une teneur fixe de 5kg/T. La protéine idéale de référence utilisée a été celle proposée par l'ARC (1981). Dans toutes les optimisations, 18 contraintes ont été imposées parmi lesquelles, 11 concernaient les acides aminés essentiels. Le coût associé au rejet d'azote (facteur β ; FF/kg ou \$/kg d'azote rejeté) a varié entre 0 (optimisation traditionnelle avec comme seul objectif de minimiser le prix) et 50 FF/kg d'azote rejeté (12,50 \$/kg d'azote rejeté au Québec). L'effet de β étant plus important pour de faibles valeurs, un intervalle de 1 FF (0,25 \$ au Québec) a été utilisé entre 0 et 10 FF/kg (0 et 2,50 \$/kg), et un intervalle de 10 FF/kg (2,50 \$/kg au Québec) entre 10 et 50 FF/kg (2,50 et 12,50 \$/kg). L'effet attendu de ce facteur est de diminuer le taux de protéine brute (PB). Cette diminution entraîne une augmentation de la teneur en EN du mélange. Nous avons donc optimisé les mélanges, soit avec une valeur fixée d'ED (14 MJ/kg), soit avec une valeur fixée d'EN (10 MJ/kg), ce qui équivaut à un rendement de 71,5 % entre l'ED et l'EN.

1.4. Calculs

La fraction digestible d'une protéine est obtenue par le produit entre le contenu brut de chaque acide aminé et les coefficients de digestibilité correspondants. Par simplicité, la disponibilité métabolique des acides aminés absorbés a été considérée de 100% indépendamment de leur origine.

Enfin, la fraction équilibrée de la protéine a été déterminée en comparant la composition en acides aminés de la protéine digestible de la formule à la composition de la protéine idéale proposée par l'ARC (1981).

Au total, 2 160 formules ont été optimisées ce qui correspond à 2 environnements économiques (Bretagne et Québec), 12 mois (janvier à décembre 1995), 3 niveaux de protéine équilibrée (90, 110 et 130 g/kg de protéine équilibrée), 15 valeurs du facteur β (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40 et 50 FF/kg) ainsi que 2 systèmes d'énergie (EN et ED). Les valeurs présentées sont la moyenne des valeurs observées à chaque mois. Le prix des formules n'inclut aucun coût de fabrication ou de transport. Le coût d'alimentation a été calculé pour un porc moyen en considérant une consommation de 40, 95 et 85 kg d'aliments dans les intervalles de poids de 25 à 45 kg, de 45 à 75 kg et de 75 à 105 kg respectivement. Les teneurs en protéine équilibrée de ces aliments étant de 130, 110 et 90 g/kg respectivement.

Pour faciliter la lecture des graphiques, les résultats pour le contexte québécois ne seront étudiés que dans le texte.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Teneur en protéine des formules

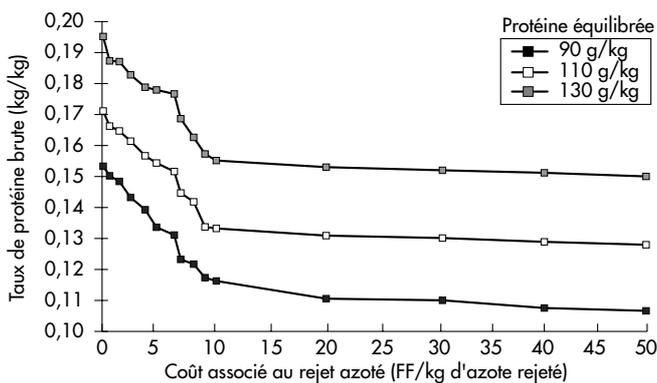
Pour l'ensemble de l'année 1995, une augmentation du coût associé au rejet d'azote (facteur β) entraîne une diminution de la teneur en PB de l'aliment et ceci pour les trois types de formules (figure 1). Il y a aussi un effet du facteur β plus important pour des valeurs inférieures à 10 FF/kg d'azote rejeté. Dans le contexte québécois, le point de rupture se situe aux alentours de 2 \$/kg mais il est moins évident que celui observé dans le contexte français. Ainsi, l'effet de l'augmentation de la valeur du facteur β en-dessous de ces points de rupture ($\beta < 10$ FF/kg) sur la protéine brute de l'aliment est hautement linéaire. En effet, la corrélation (r) entre la protéine brute de la ration et la valeur de β est supérieure à 0,98 en France et à 0,91 au Québec pendant que les pentes sont de 0,4 et de 0,6 points de pourcentage par unité de β . Au delà de ces points de rupture, la diminution du taux de protéine de la ration avec l'augmentation du facteur β est quasiment nulle car le rapport entre la fraction équilibrée et digestible de la protéine absorbée est supérieur à 95 % et la digestibilité de la protéine est supérieure à 85 %. Ces valeurs ne peuvent pas être améliorées davantage avec les matières premières disponibles ce qui explique l'apparition de ces points de rupture et le plafonnement du système d'optimisation.

Dans tous les cas, la quantité de protéine équilibrée est égale au minimum fixé pour l'optimisation. La diminution de la teneur en PB avec l'augmentation du facteur β se fait essentiellement par la modification de l'équilibre de la protéine qui passe de 70-80 % à plus de 95 % dans l'intervalle de 0 à 10 FF/kg d'azote rejeté et, de façon beaucoup moins importante, par augmentation de la digestibilité qui

passé de 85 % à 87 % dans ce même intervalle. Cette augmentation de la fraction équilibrée de la protéine est le résultat d'une recherche de complémentarité entre les acides aminés contenus dans les différentes matières premières, l'introduction des acides aminés de synthèse et l'augmentation du nombre d'acides aminés se situant aux minima spécifiés dans les contraintes nutritionnelles. Ainsi, dans le contexte français, le nombre moyen d'acides aminés situés à ce niveau minimal est passé de 2 à 4 lorsque l'augmentation de β allait de 0 à 10 FF/kg. Dans le contexte québécois, ces valeurs passent de 2 à 2,5 lorsque β augmente de 0 à 2 \$/kg d'azote rejeté. Ces valeurs sont toujours plus élevées pour les formules à teneur en protéine équilibrée élevée.

Le système d'énergie utilisé a aussi un effet sur l'impact du coût associé au rejet d'azote (facteur β) sur la réduction de la teneur en protéine brute de l'aliment. En France, les formules optimisées avec le système d'EN, ont tendance à être moins riches en protéine (19,5 % au lieu de 21 %). En fait, le système d'EN pénalise les aliments riches en protéine, car ce nutriment a un rendement d'utilisation de son ED plus faible que les autres nutriments (NOBLET et al, 1989). Par contre, il n'y a pas de différence au Québec entre les systèmes d'énergie. Ce manque de différence s'explique par un nombre plus restreint de matières premières disponibles au Québec limitant les solutions économiquement intéressantes. Enfin cette différence de taux de PB lorsque β est nul explique que l'effet de l'augmentation de β a un impact plus important et dure plus longtemps lorsque l'ED est utilisée pour l'optimisation.

Figure 1 - Effet du coût associé au rejet d'azote (facteur β) sur la teneur moyenne en protéine brute des trois types d'aliments formulés dans le contexte français

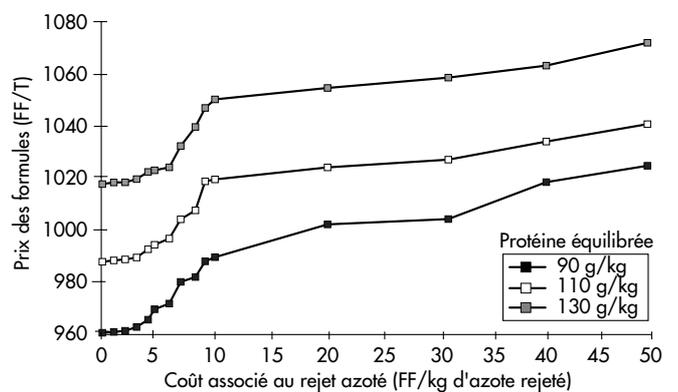


2.2. Prix des formules

Pour l'ensemble de l'année 1995, l'augmentation de la valeur de β a produit une augmentation du prix de l'aliment (figure 2). Comme dans le cas de la teneur en PB, nous avons observé un point de rupture dans l'effet du facteur β sur le prix de l'aliment. Par ailleurs, l'augmentation du prix de l'aliment avec l'augmentation de β est d'autant plus faible que le taux de protéine équilibrée désiré est faible. Le

prix des formules optimisées en utilisant l'EN augmente moins rapidement que celles optimisées avec l'ED. Contrairement à la diminution de la protéine de l'aliment avec β , l'augmentation du prix des aliments formulés dans le contexte français n'est pas nécessairement linéaire et est plus difficilement prévisible. Par contre, dans le contexte québécois, le nombre restreint de matières premières disponibles supprime le point de rupture et rend l'augmentation du prix en fonction de la variation de β plus progressive.

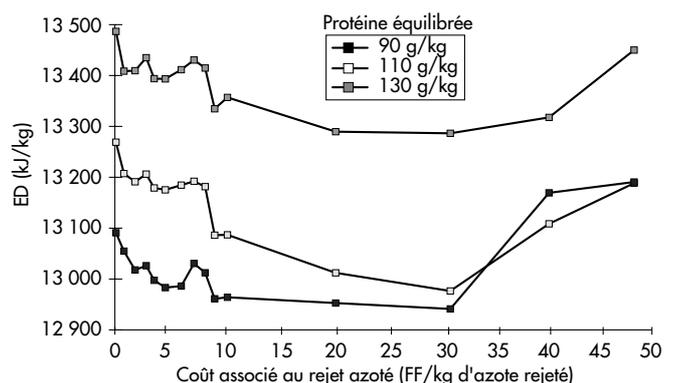
Figure 2 - Effet du coût associé au rejet d'azote (facteur β) sur le prix des trois types d'aliments formulés dans le contexte français



2.3. Teneur en énergie des formules

Etant donné la moindre efficacité de l'ED des protéines pour satisfaire les besoins en énergétiques animaux (rapport ED/EN plus faible), les différences entre les deux systèmes d'énergie ED et EN augmentent avec le niveau de protéine de l'aliment. En accord avec ce principe, nous observons que les aliments formulés sur la base de l'EN, c'est-à-dire avec un niveau d'EN constant, voient leur ED diminuer avec l'augmentation de la valeur du paramètre β . Ceci correspond également à une diminution de la teneur en protéine brute de l'aliment (figure 3). A l'inverse, lorsque la teneur en

Figure 3 - Effet du coût associé au rejet d'azote (facteur β) sur la teneur en énergie digestible des trois types d'aliments formulés dans le contexte français



ED de l'aliment est fixée, la teneur en EN augmente avec l'augmentation du paramètre β à cause de la diminution de la teneur en protéine. Par contre, pour les valeurs de β les plus élevées, l'ED augmente jusqu'à des valeurs voisines de celles obtenues avec des β proches de 0. Cette dernière tendance, ainsi que les fluctuations autour de celle-ci, sont dues aux variations des nutriments autres que la protéine pris en compte dans le calcul de l'EN.

2.4. Composition en matières premières

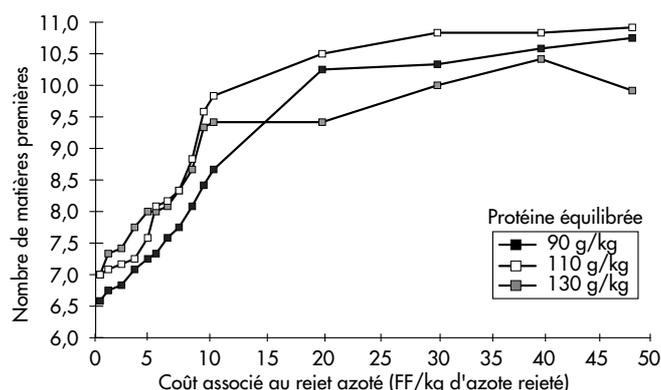
D'une manière générale, lorsque l'équilibre de la protéine est recherché comme résultat de l'augmentation du coût associé au rejet d'azote (facteur β), le nombre de matières premières augmente et tend vers 9 à 11 en France (figure 4) et vers 6-9 au Québec. Dans les deux contextes économiques, le nombre de matières premières qui rentrent dans la formule optimale augmente avec le niveau de protéine requis, ce dernier effet étant plus évident sur le contexte québécois.

L'incorporation des acides aminés de synthèse (lysine, méthionine, thréonine et tryptophane) dans les aliments varie dans le même sens que β et sont tous utilisés dans les formules ayant les teneurs en protéine équilibrée les plus élevées.

En France, le système d'énergie utilisé peut avoir un effet très marqué sur l'utilisation des céréales. En effet, les teneurs en céréales demeurent toujours supérieures à 15 % lorsqu'on utilise l'ED et à 30 % avec le L'EN. Au Québec, ces teneurs sont toujours au-dessus de 40 %. Dans tous les cas, cette utilisation est d'autant plus importante que la quantité de protéine équilibrée dans la formule est faible et que l'environnement est pris en compte. Ceci s'explique par la diminution de l'utilisation des sources de protéine à cause de leur teneur en azote et des sous-produits végétaux à cause de leur digestibilité relativement faible.

Enfin, lorsque le coût associé au rejet d'azote augmente, on note une diminution de l'utilisation des matières premières riches en protéine voire une même disparition dans le cas des formules à 90 g/kg de protéine équilibrée.

Figure 4 - Effet du coût associé au rejet d'azote (facteur β) sur le nombre de matières premières entrant dans la solution optimale des trois types d'aliments formulés dans le contexte français

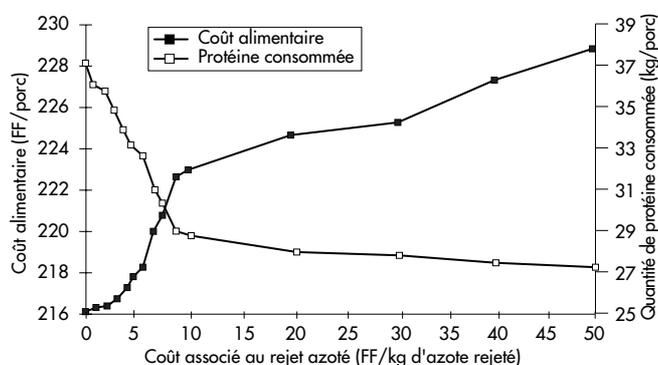


2.5. Coût d'alimentation d'un porc

En France, lorsque le coût associé au rejet d'azote augmente de 0 à 10 FF/kg, on observe une diminution de 22,6 % de la consommation de protéine (28,7 contre 37,1 kg/porc) tandis que l'augmentation du coût d'alimentation n'est que de 3 % (222,98 contre 216,22 FF/porc). L'utilisation de l'ED pour optimiser les formules augmente l'effet du coût associé au rejet d'azote, car la diminution de la consommation de protéine atteint 24,9 %, tandis que l'augmentation de prix est de 2,2 %. Ces différences s'expliquent par l'augmentation de l'efficacité de la transformation de l'ED en EN, mais aussi par la diminution du coût marginal lié aux contraintes énergétiques.

Au Québec, lorsque le facteur β augmente de 0 à 2,5 \$/kg d'azote rejeté, la diminution de la consommation de protéine atteint 9,9 % (29,2 contre 32,4 kg/porc) alors que le coût alimentaire augmente de 1,1 % (40,28 contre 40,71 \$/porc). Cependant lors de l'utilisation de l'ED comme système d'énergie, la diminution de consommation de protéine est relativement proche (11,6 %), mais l'augmentation de prix est plus élevée (+1,8 %). Cette différence par rapport au contexte français est probablement due au faible nombre de matières premières.

Figure 5 - Effet du coût associé au rejet d'azote (facteur β) sur le coût alimentaire et la quantité d'azote consommée dans le contexte français



La méthode proposée dans ce travail possède les mêmes limites que les méthodes traditionnelles de formulation qui sont inhérentes à la programmation linéaire (ROY BLACK et al., 1980). Ainsi du point de vue nutritionnel, il est supposé qu'il n'existe aucun mélange idéal entre les matières premières utilisées. Autrement dit, l'important est de fournir les éléments nutritifs nécessaires sans considérer leur origine et les interrelations entre les nutriments. Cette hypothèse est très importante, car la qualité du mélange dépend principalement de la qualité de l'information disponible sur la composition des ingrédients et de leur utilisation par l'animal, mais aussi, de l'estimation des besoins de l'animal en nutriments, et en particulier en acides aminés. Avec la méthode traditionnelle, seuls un ou deux acides aminés sont limitants dans le mélange le moins cher. Par contre avec la méthode proposée, le nombre d'acides aminés à se situer à cette limi-

te inférieure augmente rapidement avec l'augmentation du coût associé au rejet d'azote (facteur β). Par conséquent, pour utiliser efficacement cette méthode de formulation, il est essentiel d'évaluer le potentiel nutritif de la protéine des aliments à l'aide d'une estimation précise des acides aminés digestibles et disponibles pour le métabolisme de l'animal. Il est également important de bien déterminer les besoins en acides aminés des animaux. L'utilisation du concept de protéine idéale, malgré ses limitations, peut aider à simplifier l'utilisation de cette méthode. La protéine idéale utilisée dans ce travail n'est donnée qu'à titre indicatif et d'autres définitions peuvent être plus appropriées dans des contextes pratiques d'utilisation. Cette méthode peut aussi être étendue pour incorporer dans la fonction objectif la réduction d'autres polluants comme le phosphore.

CONCLUSION

Il est possible de modifier l'alimentation pour diminuer les pertes d'azote de la production porcine en optimisant l'utilisation de la protéine contenue dans les aliments. L'utilisation d'une méthode de formulation qui considère l'équilibre des acides aminés et dont la fonction objectif inclut des contraintes environnementales, s'avère un outil de choix pour marier les objectifs économiques avec celui de la réduction de la charge polluante du lisier de porc.

L'introduction d'un coût associé au rejet d'azote (facteur β)

dans la fonction objectif de l'algorithme de formulation diminue les rejets d'azote, mais augmente le prix des aliments. Cette diminution des rejets d'azote est prononcée pour de petites valeurs de β mais tend à se stabiliser au delà d'un certain seuil. Ainsi, dans le contexte français, et pour l'année 1995, une valeur de β de 10 FF/kg d'azote rejet aurait entraîné une augmentation du coût d'alimentation de 6,76 FF/porc (+3 %) et une réduction de la protéine consommée de 8,4 kg/porc (-22,6 %). Des résultats similaires auraient été obtenus dans le contexte québécois.

Finalement, un des effets importants de cette méthode d'optimisation est de favoriser les formules ayant un meilleur équilibre entre acides aminés, en plus de chercher un compromis entre le coût du mélange et la réduction de l'excrétion d'azote. Ce meilleur équilibre permet de réduire la teneur en PB de l'aliment sans affecter le niveau de performances des animaux. Cette diminution du niveau protéique de l'aliment se traduit par une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'énergie des aliments.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du développement de PorcExpert 2.0 (logiciel de modélisation de la croissance des porcs charcutiers) avec la collaboration de Techna Nutrition Animale et Génétiporc. Les auteurs remercient Chaouki BENCHAAAR pour son aide lors de la proposition de ce manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARC, 1981. The nutrient requirement of pigs. Commonwealth agric. Bureau, England, 307 p.
- BATTERHAM et al., 1990. Br. J. Nutr. 64, 679.
- BUNDAY B, GARSIDE G, 1987. Linear programming in Pascal. Edward Arnold éd.
- CLUIS, COUTURE, 1987. Sciences et techniques de l'eau, vol20-21, p311.
- INRA, 1989. L'alimentation des animaux monogastriques : porc, lapin, volailles. INRA éd. Paris, 282p.
- NOBLET J, FORTUNE H, DUBOIS S, HENRY Y, 1989. Nouvelles bases d'estimation des teneurs en énergie digestible métabolisable et nette des aliments pour le porc. INRA éd. Paris, 105 p.
- PATIENCE, THACKER. 1989. Swine nutrition guide, University of Saskatchewan. Prairie Swine Center, Saskatoon, Saskatchewan.
- POMAR C., BARNETT. 1994. Séminaire BASF, 1994. 29 mars 1994, Guelph, Ontario et 30 mars 1994, Durmmonville, Québec
- RHÔNE POULENC ANIMAL NUTRITION (RPAN). 1993. RhodimetTM Nutrition Guide, 39p.
- ROY BLACK J, HLUBIK J, 1980. J Dairy Sci 63, 1366-1378.
- SPIEKERS et al., 1993. Agribiological Research - Zeitschrift fur Agrarbiologie Agrikulturchemie Okologie. 42(2), 101.
- TAYLOR et al., 1979. Anim. prod. 29, 327.
- VALAJA et al., 1993. Agricultural Science in Finland 2(2), 117.