

# Impact de la méthode de formulation et du nombre de phases d'alimentation sur le coût d'alimentation et les rejets d'azote et de phosphore chez le porc charcutier

Marie-Pierre LETOURNEAU MONTMINY (1,4), Christian BOUCHER (2) Candido POMAR (1),  
François DUBEAU (2), Jean-Pierre DUSSAULT (3)

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

(2) Département de mathématiques, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Qc), J1K 2R1 Canada

(3) Département d'informatique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Qc), J1K 2R1 Canada

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

## Impact de la méthode de formulation et du nombre de phases d'alimentation sur le coût d'alimentation et les rejets d'azote et de phosphore chez le porc charcutier

Les conséquences économiques et environnementales d'aliments selon différentes méthodes de formulation et fournis aux porcs charcutiers selon différents plans d'alimentation ont été étudiées. La méthode de formulation à moindre coût a été utilisée selon la pratique courante (MT) ou en permettant que la densité nutritionnelle soit optimisée (DO). La méthode MT a ensuite été modifiée afin de permettre l'optimisation simultanée de deux prémélanges, complets (PC) ou non (PnC), dont leur combinaison, en des proportions variables, satisfait les besoins des porcs entre 20 et 130 kg de poids vif. Les aliments préparés selon ces quatre méthodes ont été fournis selon 10 plans d'alimentation caractérisés par le nombre de phases (2, 3, ... 10, et 111). La méthode DO diminue le coût des aliments, par rapport à MT, de 0,55 % et les rejets d'azote et de phosphore de 2,2 à 3,8 %, respectivement. Cependant, l'augmentation du nombre de phases d'alimentation a plus d'effet sur le coût des aliments et les rejets minéraux que le méthode de formulation. Les méthodes PC et PnC, quoique moins efficaces que les méthodes MT et DO pour un même plan d'alimentation, simplifient la préparation d'aliments multiphasés. Comparativement à la méthode MT à trois phases, la méthode PC à 111 phases permet de réduire le coût d'alimentation et les rejets de phosphore et d'azote de 1,8, 10,2, 13,0 %, respectivement. Cependant, la formulation des prémélanges selon les méthodes PC et PnC devient un problème non linéaire nécessitant des algorithmes de résolution compliqués. Conséquemment, ces algorithmes nécessitent d'être simplifiés et raffinés davantage avant d'être utilisés par l'industrie.

## The impact of using different formulation methods and feeding programs on feeding cost and phosphorous and nitrogen excretion in growing-finishing pigs

The economical and environmental consequences of feeding pigs with diets obtained with different formulation methods and served according to different feeding programs were studied. The least-cost formulation method (MT) was applied as used by the feed industry or modified to optimize nutrient density (DO). The MT method was also modified to simultaneously formulate two complete diets (PC) or two premixes (PnC), which blended at specific proportions, satisfied the nutrient requirements of pigs from 20 to 130 kg bodyweight. Diets were served according to ten phase feeding programs (2, 3, ... 10, et 111). In relation to the MT method, the DO method decreased feeding cost by 0.55% and the excretion of phosphorous and nitrogen by 2.2 and 3.8%, respectively. However, increasing the number of diets in phase feeding programs was more efficient to reduce feeding cost and mineral excretion than modifying the formulation method. The PC and PnC methods, although less efficient than the MT and DO methods to reduce feeding cost and mineral excretion, allow blend feeding which simplifies the implementation of complex phase feeding programs. Thus, in relation to the three phase MT program, the daily PC program reduced feeding cost, and phosphorous and nitrogen excretion, by 1.8, 10.2 and 13%, respectively. However, the PC and PnC formulation problem is non linear and requires the utilisation of complex optimisation algorithms. Consequently, blend feeding algorithms need to be simplified before used by the feeding industry.

## INTRODUCTION

Chez le porc en croissance, le coût d'alimentation peut représenter plus de 65 % des coûts de production (SHELTON, 2004). Les aliments sont donc formulés pour minimiser leur coût tout en fournissant les nutriments nécessaires permettant aux animaux d'exprimer leur plein potentiel de croissance (PATIENCE et al, 1995). La quantité journalière, de ces mêmes nutriments, augmente pendant la période de croissance suite à l'accroissement progressif des besoins d'entretien et de croissance (ARC, 1981; NRC, 1998). Toutefois, le besoin en énergie augmente plus rapidement que celui des autres nutriments et, puisque l'énergie est un nutriment déterminant dans le contrôle de la prise alimentaire (POMAR et MATTE, 1995; ROY et al, 2000), la consommation volontaire d'aliment augmente aussi plus rapidement que n'augmentent les besoins en nutriments autres que l'énergie (WHITTEMORE et al, 2001). Conséquemment, la concentration idéale de ces autres nutriments doit diminuer progressivement par rapport à l'énergie lorsque nous cherchons à minimiser le coût de l'alimentation, à accroître l'efficacité d'utilisation des nutriments ou à diminuer la charge polluante des lisiers (POMAR et BARNETT, 1994).

Pour des raisons évidentes de régie, il est pratique courante de diviser la période d'engraissement en phases pendant lesquelles les animaux reçoivent un même aliment. Ainsi, 67,2 % des élevages de porcs charcutiers du Québec utilisent trois phases d'alimentation (PIGEON, 2001). La concentration des nutriments, le coût des aliments et les rejets de nutriments diminuent avec le nombre de phases d'alimentation (POMAR et BARNETT, 1994; BOURDON et al, 1995; KNOWLTON et al, 2004). Par contre, l'augmentation du nombre de phases d'alimentation complique la régie, et entraîne parfois une augmentation du coût des installations, décourageant l'implantation de cette pratique commercialement. Une façon de palier à ces inconvénients est l'utilisation de deux prémélanges qui, combinés à des proportions déterminées, pourront satisfaire les besoins des animaux tout au long de leur croissance (FEDDES et al, 2000). Ces prémélanges sont généralement des aliments complets formulés pour satisfaire les besoins des porcs au début et à la fin de la croissance. La concentration optimale des aliments destinés aux porcs en finition est très basse ce qui nécessiterait parfois la libération des contraintes de densité nutritionnelle imposées normalement par l'industrie (WHITTEMORE et ELSLEY, 1976; DE LANGE, 1996). Néanmoins, toutes ces techniques de formulation ne permettent pas de formuler ces prémélanges simultanément, ce qui permettrait de diminuer davantage le coût de l'alimentation tout en s'assurant que les besoins des animaux sont satisfaits durant toute la croissance. Le but de cette étude est donc d'évaluer la faisabilité de formuler simultanément deux prémélanges satisfaisant les besoins des animaux pendant la période d'engraissement et d'évaluer numériquement l'impact des méthodes de formulation et du nombre de phases d'alimentation sur le coût des aliments et les rejets d'azote (N) et de phosphore (P) chez le porc charcutier. Cette étude est la suite de celles effectuées précédemment dans le but de réduire les rejets de minéraux par le biais de la formulation (JEAN DIT BAILLEUL et al, 2001; POMAR et al, 2004 et DUBEAU et al, 2004).

## 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). La programmation linéaire, que nous avons utilisée dans cette étude, implique la détermination du niveau d'incorporation des ingrédients qui, en respectant une série de contraintes linéaires, minimise une fonction objectif, 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. Deux aliments complets sont considérés comme équivalents lorsqu'ils respectent toutes les contraintes imposées.

### 1.2. Préparation des aliments

#### 1.2.1. Par formulation d'aliments complets à densité nutritionnelle fixe (MT)

La méthode traditionnelle de formulation d'aliments a été décrite par BERTSIMAS et TSITSIKLIS (1997), IGNACIO et CAVALIER (1994) et par DANTZIG (1990). Dans cette méthode, le coût du mélange, un aliment complet dans ce contexte, est minimisé en satisfaisant toutes les contraintes nutritionnelles imposées. Pour cette méthode les quantités de nutriments des ingrédients et des aliments sont exprimées par rapport à une quantité d'aliment, soit en g/kg dans ce document. 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 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 à densité nutritionnelle fixe 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 la méthode traditionnelle une de ces contraintes, la contrainte de poids, a la forme  $\sum_{i \in I} x_i = 1$ , et force les quantités des nutriments  $j$  présents dans une unité de poids d'aliment à être égales (ou supérieures) à celles exprimées dans  $\vec{b}$ . Cette méthode est la plus fréquemment utilisée aujourd'hui par les industries de l'alimentation animale.

### 1.2.2. Par formulation d'aliments complets avec densité nutritionnelle optimisée (DO)

Les facteurs qui contrôlent l'ingestion volontaire d'aliment chez le porc sont nombreux et complexes et ils répondent à des systèmes de contrôle à long, moyen et court terme. Cependant, on peut assumer de façon simplifiée que le porc consomme des aliments pour satisfaire ses besoins énergétiques (EMMANS, 1981; BLACK et al, 1986). Ainsi, les porcs consommeront une plus grande quantité d'aliments peu concentrés (PEKAS, 1983; POMAR et MATTE, 1995) tout comme ils limiteront la consommation d'aliments riches en énergie (HENRY, 1974; ROY et al, 2000) de façon à consommer une quantité d'énergie permettant de satisfaire leurs besoins. Si ces observations sont justes, deux aliments complets peuvent être considérés équivalents lorsque les rapports nutriments/énergie sont égaux. Une approche similaire a été proposée par WHITTEMORE (1976) et DE LANGE (1996).

Ce principe peut être exploité pour formuler des aliments complets dont la densité nutritionnelle n'est pas imposée. Pour ce faire, la contrainte  $\sum_{i \in I} x_i = 1$  de la méthode antérieure est enlevée et les éléments  $a_{ij}$  de la matrice A et les éléments  $b_j$  du vecteur  $\vec{b}$  sont exprimés par rapport, non pas à un poids donné d'ingrédient ou d'aliment, mais plutôt par rapport à leur teneur en énergie digestible. L'énergie digestible a été préférée à l'énergie nette en accord avec des résultats obtenus antérieurement (POMAR et MATTE, 1995; NRC, 1998; ROY et al, 2000). Toutes les solutions faisables de cette méthode de formulation auront des rapports nutriments/énergie digestible équivalents mais pourront avoir des concentrations nutritionnelles différentes.

### 1.2.3. Par formulation de deux aliments complets (A et B) pour une alimentation par mélange (PC)

Pour palier aux inconvénients liés à l'utilisation d'un grand nombre de phases d'alimentation, l'obtention d'un aliment complet par mélange de deux prémélanges a été proposée (FEDDES et al, 2000). Par simplicité, ces prémélanges sont des aliments complets, le premier (A) pouvant satisfaire les besoins nutritionnels des animaux au début de la période de croissance et le deuxième (B) ceux de la fin de cette même période. Ainsi, la proportion de l'aliment A dans le mélange diminue à mesure que les besoins des animaux diminuent. Les prémélanges A et B sont formulés selon la méthode décrite dans la section 2.2.1 en imposant que leur mélange à des proportions déterminées puisse satisfaire les besoins des porcs pendant la période de croissance de 20 à 130 kg de poids vif simulée. Le problème de formulation devient ainsi non linéaire. Les formules ont été obtenues à l'aide du langage de modélisation algébrique AMPL (AT&T Bell

Laboratories, Lucent Technologies, NJ, USA) qui résout des problèmes liés à la programmation non linéaire et en nombres entiers à l'aide de 25 solveurs différents, dont le plus utilisé a été MINOS (Stanford Business Software, Inc. CA, USA).

### 1.2.4. Formulation simultanée de deux prémélanges ( $X_A$ et $X_B$ ) non complets pour une alimentation par mélange (PnC)

Dans la méthode antérieure, il a été imposé, entre autre, que les deux prémélanges A et B soient 1) complets et 2) qu'ils puissent satisfaire seuls les besoins des porcs au début et à la fin de la période de croissance. Or ces deux conditions ne sont pas nécessaires et leur imposition risque d'augmenter le coût de l'alimentation. Pour palier à ces inconvénients, deux prémélanges ( $X_A$  et  $X_B$ ) peuvent être obtenus simultanément pour que, combinés dans des proportions déterminées, ils puissent satisfaire, comme pour la méthode PC, les besoins des animaux tout au long de leur croissance. Ces prémélanges ne sont pas nécessairement complets et ils sont en fait des vecteurs correspondant à une quantité d'ingrédients par unité de mélange :

$$X_A = (X_{A,j})_{j=1}^n \quad \text{et} \quad X_B = (X_{B,j})_{j=1}^n$$

où  $X_{A,j}$  représente la quantité (kg ingrédient/kg aliment) du  $j^{\text{ème}}$  ingrédient dans le prémélange A par unité de prémélange A et  $X_{B,j}$  représente la quantité (kg ingrédient/kg aliment) du  $j^{\text{ème}}$  ingrédient dans le prémélange B par unité de prémélange B. On doit avoir

$$\sum_{j=1}^n X_{A,j} = 1 \quad \text{et} \quad \sum_{j=1}^n X_{B,j} = 1$$

Les variables d'un tel modèle ne sont maintenant plus les ingrédients dans le mélange, mais des proportions de mélange utilisées à chaque phase :

$$\alpha = (\alpha_k)_{k=1}^T$$

où  $\alpha_k$  est la proportion de prémélange A utilisée à la phase  $k$ , ( $k = 1, \dots, T$ ) et donc  $\beta_k (\beta_k = 1 - \alpha_k)$  sera la proportion de prémélange B utilisée à la phase  $k$ . Le mélange ainsi donné à l'animal durant la phase  $k$  est

$$X_k = \alpha_k X_A + \beta_k X_B$$

en quantité journalière déterminée et vérifiant les contraintes du modèle.

Ainsi, la fonction objectif devient :

$$\min Z = C_A p \alpha + C_B p \beta = (\sum_{j=1}^n c_j X_{A,j}) (\sum_{K=1}^T p_K \alpha_K) + (\sum_{j=1}^n c_j X_{B,j}) (\sum_{K=1}^T p_K \beta_K)$$

où les  $p_k$  sont des quantités prédéterminées. Les solutions à ce problème ont été obtenues comme dans la section antérieure.

### 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). La composition des données non publiées ou l'estimation de la composition de certains nutriments, tel que le P disponible, a été présentée précédemment (POMAR et al, 2004). Les prix des ingrédients utilisés dans cette étude sont la moyenne de ceux enregistrés au début de chaque mois entre juin 2002 et mai 2003 par un collaborateur de l'industrie québécoise (Coopérative Fédérée de Québec, Montréal). Des contraintes d'ordre technologique, d'appétence et de qualité des ingrédients ont été fournies par des collaborateurs (Coopérative Fédérée de Québec ; INZO, Château-Thierry).

### 1.4. Évaluation de l'impact de la méthode de formulation et du nombre de phases d'alimentation

Tous les résultats de cette étude ont été obtenus de façon numérique. Ainsi, la consommation volontaire, la croissance et les besoins des animaux ont été calculés pour la période de 20-130Kg de poids vif, soit 111 jours d'engraissement, par simulation selon la méthode proposée par le NRC (1998). Le porc simulé dans cette étude est un porc moyen, de sexe mélangé, ayant un potentiel de croissance musculaire de 325 g/j.

Les aliments complets ont été obtenus selon les quatre méthodes décrites précédemment. Ainsi, dans la méthode traditionnelle (MT) et dans la méthode à densité optimisée (DO) chaque aliment utilisé a été formulé indépendamment. Par contre, les aliments utilisés avec les méthodes à prémélanges complets (PC) et à prémélanges non complets (PnC) sont obtenus par la combinaison de deux prémélanges. Pour chaque formule, 33 contraintes ont été imposées, dont 13 concernaient les acides aminés, tel que proposé antérieurement (POMAR et al, 2004). Le coût des formules est la somme du coût des matières premières utilisées sans considérer les coûts associés à la formulation, à l'entreposage, au transport ou à la distribution.

Les impacts économiques et environnementaux de la méthode de préparation des aliments selon les quatre méthodes de formulation antérieures ont été comparées selon 10 plans distincts d'alimentation caractérisés par le nombre de phases (2, 3, ..., 10 et 111 phases). La durée des phases étant similaire dans chaque plan d'alimentation. Les porcs ont été alimentés avec un seul aliment pendant chaque phase d'alimentation.

L'azote rejeté a été calculé par différence entre l'azote ingéré et celui déposé durant la phase, sachant que la teneur moyenne en azote d'une protéine est de 16 % (BOISEN et al, 1987). Le phosphore rejeté a été calculé par différence entre le P total ingéré et les besoins sous forme disponible. Les rejets réels en P seront 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.

## 2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

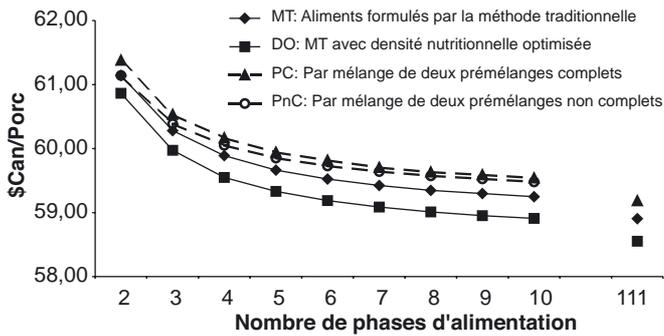
Les coûts associés à la formulation, à l'entreposage, au transport et à la distribution peuvent être très différents d'un contexte de production à un autre n'ont donc pas été considérés dans le coût total des aliments. Conséquemment, indépendamment de la méthode de préparation d'aliments choisie, le coût de ceux-ci, diminuera avec l'augmentation du nombre de phases d'alimentation. Pour des raisons liées à la complexité de la programmation, la densité des nutriments n'a pas pu être optimisée dans les méthodes PC et PnC. Pour cette même raison, le coût des aliments et les rejets de N et de P de la méthode PnC du plan d'alimentation à 111 phases n'ont pu être effectués.

### 2.1. Coûts des aliments

La formulation d'aliments complets à densité nutritionnelle fixe (MT) est la méthode de préparation d'aliments la plus fréquemment utilisée par l'industrie agroalimentaire. Cette méthode est équivalente à celle utilisée dans des études antérieures lorsque aucun coût n'était attribué aux rejets (JEAN DIT BAILLEUL et al, 2001 ; POMAR et al, 2004). Les coûts de l'alimentation sont néanmoins légèrement supérieurs à ceux rapportés dans ces travaux du fait que nous avons utilisé dans cette étude une période de croissance plus longue. Dans cette étude, le coût des aliments consommés par les porcs pendant la période de 20 à 130 kg de poids vif, varient entre 58,55 et 61,38 \$/porc.

Dans les méthodes de préparation d'aliments MT et DO, un aliment par phase d'alimentation doit être formulé ce qui rend ces méthodes de préparation d'aliments compliquées pour des plans d'alimentation à plusieurs phases. Cependant, le coût des aliments obtenus par ces méthodes sera toujours plus bas, indépendamment du plan d'alimentation choisi, que le coût associé à la préparation d'aliments par la combinaison de prémélanges (PC et PnC) (figure 1). Ainsi, le coût d'alimentation des porcs alimentés avec les méthodes PC et PnC est en moyenne 0,46 % (59,67 vs. 59,95 \$/porc) et 0,29 % (59,67 vs. 59,93 \$/porc) supérieur à celui du coût d'alimentation des porcs MT. Par contre, nous avons aussi observé que la formulation sans contrainte de poids (méthode DO), c'est-à-dire, en optimisant la concentration des nutriments, est la méthode de formulation permettant de réduire le plus le coût de l'alimentation. Ainsi, le coût d'alimentation des porcs nourris avec la méthode DO, tout plan d'alimentation confondu, est inférieur de 0,55 % (59,67 vs 59,34 \$/porc) à la méthode MT de préparation des aliments. Les avantages de cette méthode s'observent principalement lors de la formulation d'aliments requérant une plus basse concentration de nutriments comme sont ceux destinés aux porcs en finition. Ceci explique le fait que l'écart de coût entre la méthode DO et les autres méthodes s'accroît avec l'augmentation du nombre de phases d'alimentation.

Le coût des aliments consommés par les porcs diminue avec l'augmentation du nombre de phases d'alimentation (figure 1) tel qu'observé dans la littérature (POMAR et BARNETT, 1995). Cet effet résulte de la diminution du niveau

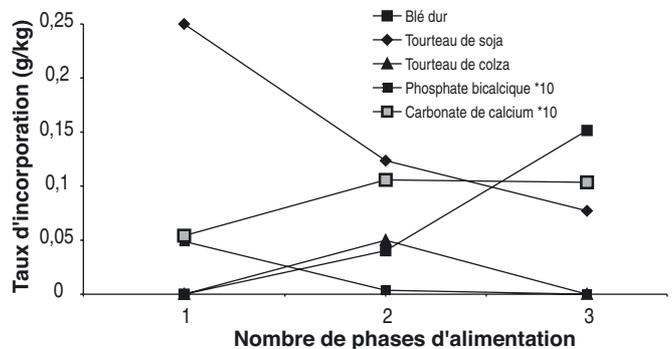


**Figure 1** - Effet du plan d'alimentation et de la méthode de préparation des aliments sur le coût des aliments fournis aux porcs charcutiers pendant l'ensemble de la période de croissance (20-130 kg de poids vif)

d'utilisation des nutriments plus onéreux tel que la protéine. Cet effet est plus marqué lorsque l'on passe d'un plan d'alimentation à deux phases à un autre à trois phases, puis cet effet diminue à mesure que le nombre de phases augmente. Ainsi, pour la méthode MT, les diminutions de coûts par rapport à un plan d'alimentation à deux phases sont de 1,4, 2,0, 2,4, 2,6 % pour des plans d'alimentation à 3, 4, 5, 6 phases, respectivement. Pour le plan d'alimentation à 111 jours, les aliments consommés coûtent 3,7 % de moins que ceux consommés par les porcs sous un plan à deux aliments. Des valeurs similaires ont été obtenues pour les autres méthodes de préparation des aliments. Pour la méthode d'alimentation la plus utilisée au Québec, c'est-à-dire le plan d'alimentation à trois phases avec des aliments préparés avec la méthode MT, la formulation d'aliments par la méthode DO pourrait contribuer à diminuer le coût de l'alimentation de 0,5 % (60,28 vs 59,97 \$/porc) pendant que le changement de méthode de formulation et l'accroissement du nombre de phases à 111 pourrait diminuer le coût des aliments de 2,3 % (60,28 vs 58,55 \$/porc). Par contre, pour le plan d'alimentation à trois phases, les coûts des aliments obtenus par les méthodes PC et PnC sont 0,4 % (60,28 vs 60,53) et 0,2 % (60,28 vs 60,39) plus élevés que ceux de référence (MT à trois phases). Lorsque nous utilisons des prémélanges pour obtenir des aliments complets, nous devons augmenter le nombre de phases pour rendre cette méthode viable économiquement. À la limite, nous pouvons nous attendre à des réductions de l'ordre de 1,8 % (60,28 vs 59,18 \$/porc) lorsque nous passons de la méthode de référence à un plan d'alimentation journalier avec des aliments préparés avec la méthode PC. Malheureusement, comme mentionné plus tôt, nous n'avons pas pu calculer les coûts de l'alimentation de ce même plan selon la méthode PnC. Il est logique de penser que ces coûts seraient encore plus bas, ce qui rendrait cette méthode plus intéressante que la précédente. Néanmoins, la formulation simultanée de prémélanges est compliquée et il est possible que son utilisation pratique ne soit pas techniquement viable à court terme.

De façon générale, plus la qualité nutritionnelle des matières premières est élevée, plus leur intérêt dans la formule augmente en début d'engraissement, les besoins étant plus élevés. En effet, pour le plan d'alimentation à 3 phases avec la méthode MT le tourteau de soja, par exemple, chute suivant

l'augmentation du numéro de phases (figure 2). Cet ingrédient est très riche en nutriments, mais dispendieux. Le tourteau de colza augmente avec la diminution du tourteau de soja, mais comme sa quantité est restreinte, il atteint vite son maximum et il est secondé par le blé dur qui augmente continuellement jusqu'à la fin de l'engraissement. Le carbonate de calcium augmente à la deuxième phase et est constant par la suite. Cette augmentation sert à remplacer les apports décroissants de minéraux provenant du tourteau de soja et du phosphate bicalcique dans les aliments. Cependant, cet ingrédient est incorporé dans l'aliment en quantité plus importante que le besoin en calcium ne le justifie, ce qui indique l'utilisation de cet ingrédient pour du remplissage. L'utilisation de certains ingrédients pour du remplissage s'accroît avec l'accroissement du nombre de phases d'alimentation puisque le rapport idéal entre les nutriments et l'énergie diminue avec le poids des animaux.



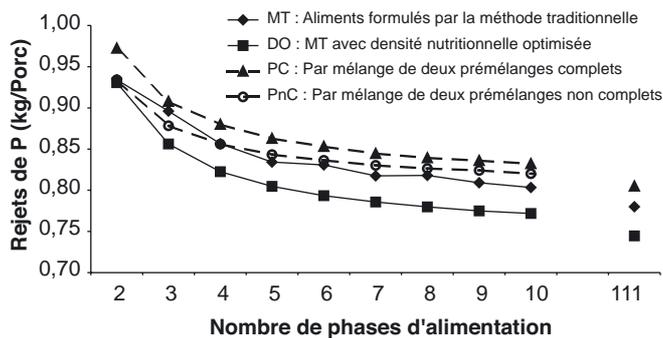
**Figure 2** - Effet du plan d'alimentation et de la méthode de préparation des aliments sur le taux d'incorporation des ingrédients dans les aliments fournis aux porcs charcutiers

## 2.2. Rejets de phosphore

Les rejets de P ont été calculés par différence entre le P total des aliments et les besoins en P disponible. Ainsi, le P excrété varie dans cette étude entre 0,745 et 0,972 kg par porc pendant la période de croissance simulée (20 à 130 kg de poids vif). Ces valeurs sont cohérentes avec celles observées de 0,905 kg/porc corrigée pour des porcs de 20 à 130 kg en alimentation biphasé (CORPEN, 2003), de 0,560 kg/porc entre 20-105 kg (POMAR et al, 2004), de 0,920 entre 28 et 108 kg (DOURMAD et al, 1999a) ou de 0,730 kg/porc entre 26 et 113 kg (VAN DER PEET-SCHWERING et al, 1999). Le P excrété étant la différence entre le P ingéré et le retenu (DOURMAD et al, 2002) les différences qui peuvent exister entre ces valeurs sont principalement le résultat des différences entre les programmes alimentaires utilisés.

Dans cette étude, les rejets de phosphore ont été fortement influencés par le méthode de préparation des aliments et par le nombre de phases d'alimentation. Ainsi, les porcs ont rejeté en moyenne pour les phases 2 à 10, 0,844, 0,813, 0,870 et 0,850 g/porc de P selon que les aliments ont été préparés respectivement par les méthodes MT, DO, PC et PnC. L'efficacité de la méthode DO à réduire les rejets de P par rapport aux autres méthodes résulte de la capacité de

cette méthode de réduire la concentration de minéraux dans les aliments, en particulier pendant les périodes de finition. Ceci est mis en évidence par le fait que lorsque le nombre de phases d'alimentation augmente les rejets de P diminuent davantage pour la méthode DO que pour les autres méthodes (figure 3). Les rejets de P obtenus avec les méthodes de préparation basées sur le mélange de deux prémélanges performent moins bien que les deux autres méthodes du fait qu'il y a eu imposition que le mélange des deux prémélanges satisfasse les besoins de tous les nutriments considérés dans toutes les phases d'alimentation. Or l'évolution des rapports entre les différents nutriments et l'énergie n'évoluent pas de la même manière au cours de la croissance.



**Figure 3** - Effet du plan d'alimentation et de la méthode de préparation des aliments sur les rejets de phosphore des porcs charcutiers pendant l'ensemble de la période de croissance (20-130 kg de poids vif)

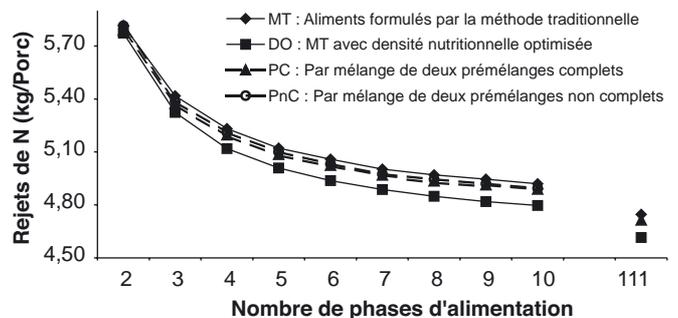
Le nombre de phases d'alimentation a cependant un impact plus important sur les rejets de P que la méthode de formulation. Ainsi, pour la méthode MT, la diminution des rejets de P par rapport au plan d'alimentation à deux phases est de 4,1, 8,3, 10,7, 11,1 % lorsque le nombre d'aliments passe à 3, 4, 5 et 6, respectivement. Pour des changements journaliers d'aliments, cette réduction est de 16,5 %, ce qui n'est pas négligeable. Tel qu'indiqué précédemment, cette diminution des rejets de P, avec l'accroissement du nombre de phases est encore plus importante pour la méthode DO que pour les autres méthodes de préparation des aliments. Ainsi, pour les porcs alimentés selon DO, la diminution des rejets de P, par rapport au plan d'alimentation à deux phases, est de 8,0, 11,6, 13,5 et 14,8 % lorsque le nombre de phases passe à 3, 4, 5 et 6, respectivement. Pour des phases journalières cette diminution est de 20,0 % quoique que cette méthode soit techniquement peu viable, tel qu'indiqué précédemment. La méthode PC, plus viable quant à elle, permettrait dans le contexte québécois de réduire les rejets de P de 10,2 %.

### 2.3. Rejets d'azote

Les rejets d'azote sont calculés par différence entre l'azote total des aliments et celui retenu par l'animal. Les rejets d'azote simulés se trouvent entre 4,62 et 5,82 kg/porc pour l'intervalle allant de 20 à 130 kg de poids vif. Ces valeurs sont proches de celles de 3,38, 4,12 et 4,26 kg/porc estimées pour la période de 28 à 108 kg de poids vif par

DOURMAD et al (1999b) pour le Danemark, la France et les Pays-Bas ou des 5,08 kg/porc qui peuvent être estimées à partir des données CORPEN (2003) pour un intervalle similaire à celui de cette étude. Comme pour le phosphore, les rejets d'azote sont fortement influencés par la composition des aliments et les différences entre les données de la littérature peuvent être dues autant aux méthodes de calcul ou de mesure qu'aux régimes alimentaires utilisés.

Dans cette étude, les rejets d'azote ont été fortement influencés par le nombre de phases d'alimentation mais l'impact de la méthode de préparation des aliments a été moins prononcé que pour le P (figure 4). Ainsi, les rejets d'azote moyens des plans d'alimentation de 2 à 10 phases ont été de 5,17, 5,06, 5,13 et 5,14 kg/porc pour les méthodes MT, DO, PC et PnC, respectivement. L'optimisation de la densité énergétique a donc permis de diminuer en moyenne, par rapport à la méthode MT, de 2,12 % les rejets d'azote ce qui dépasse les réductions de 0,69 % et 0,46 % obtenues avec les méthodes PC et PnC, respectivement.



**Figure 4** - Effet du plan d'alimentation et de la méthode de préparation des aliments sur les rejets d'azote des porcs charcutiers pendant l'ensemble de la période de croissance (20-130 kg de poids vif)

Le nombre de phases d'alimentation a un impact plus grand sur la réduction des rejets de N que la méthode de préparation des aliments. Ainsi, pour la méthode MT, la diminution des rejets de N par rapport à un plan d'alimentation à deux phases, est de 6,9, 10,1, 12,0 et 13,0 % lorsque le nombre d'aliments passe à 3, 4, 5 et 6, respectivement. Ces résultats, sont similaires avec ceux de la littérature (POMAR et BARNETT, 1994 ; LENIS, 1989 ; CHAUVEL, 1996). Pour des changements journaliers d'aliments, cette réduction est de 18,4 %. Ce dernier plan d'alimentation est néanmoins peu viable et pour des plans d'alimentation plus compliqués les méthodes de préparation des aliments PC et PnC sont plus faciles à mettre en pratique. Ainsi, pour la méthode PC, un plan d'alimentation journalier permettrait de réduire de 13 % les rejets d'azote par rapport au plan MT à deux phases. Des valeurs similaires pourraient être obtenues avec la méthode de préparation PnC quoique nous n'ayons pas obtenu la solution finale (figure 4).

### CONCLUSION

Dans les méthodes de préparation d'aliments à densité nutritionnelle fixe (MT) ou optimisée (DO), un aliment par phase

d'alimentation doit être formulé, ce qui rend ces méthodes compliquées pour des plans d'alimentation à plusieurs phases. Cependant, la méthode de formulation DO permet de diminuer les coûts et les rejets de minéraux de façon importante. De plus, elle permet de minimiser l'entrée d'ingrédients peu dispendieux dont l'apport nutritionnel n'est pas limité. L'alimentation avec deux prémélanges est une voie prometteuse pour les compagnies d'alimentation puisqu'elle permet de n'avoir que deux aliments à formuler, seules les proportions de ceux-ci changeant entre les phases d'alimentation et les élevages. Cependant, puisque les besoins des différents nutriments n'évoluent pas de la même manière au cours de la croissance, la formulation de ces prémélanges devient un problème non linéaire nécessitant des algorithmes de résolution compliqués. De meilleurs résul-

tats au niveau du coût de l'alimentation et des rejets de minéraux pourraient être obtenus par la formulation combinée tout en optimisant la densité nutritionnelle. Cette étape n'a pas encore été réalisée dû au défi important que représente sa programmation. L'ajout d'objectifs environnementaux dans l'algorithme de formulation permettrait de diminuer davantage les rejets.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient David Guillou d'INZO, et Marquis Roy et Yan Martel-Kennes de la Coopérative Fédérée de Québec pour nous 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](http://www.feedbase.com).
- ARC. 1981. The Nutrient Requirements of Pigs. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, UK.
- 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.
- BLACK J.L., CAMPBELL R.G., WILLIAMS I.H., JAMES K.J., DAVIES G.T., 1986. Res. Develop. Agric., 3, 121-145.
- BOISEN S., BECH-ANDERSEN S., EGGUM B.O., 1987. Acta Agric. Scand. 37, 299-304.
- BOURDON D., DOURMAD J.Y., HENRY Y., 1995. Réduction des rejets azotés chez le porc en croissance par la mise en œuvre de l'alimentation multiphase, associée à l'abaissement du taux azoté, Journées Rech. Porcine en France, 25, 295-300.
- CHAUVEL J., GRANIER R., 1996. Effet de l'alimentation multiphase sur la croissance et les rejets azotés du porc charcutier, Journées Rech. Porcine en France, 28, 249-256.
- CLUIS D., COUTURE P., 1987. Sci. Techn. l'Eau, 20, 311-317.
- CORPEN, 2003. Min. Agr. et Env. France.
- DE LANGE C.F.M. BAIDOO S.K., 1996. Adv. Pork Prod., 5-16.
- DOURMAD J.-Y., POMAR C., MASSE D., 2002. Modélisation du flux de composés à risque pour l'environnement dans un élevage porcin. Journ. Rech. Porcine, 34, 183-194.
- DOURMAD J. Y., GUINGAND N., LATIMIER P., SEVE B., 1999a. Nitrogen and phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production : France. Livest. Prod. Sci., 58, 199-211.
- DOURMAD J. Y., SEVE B., LATIMIER P., BOISEN S., FERNANDEZ J., VAN DER PEET-SCHWERING C., JONGBLOED A. W., 1999b. Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. Livest. Prod. Sci., 58, 261-264.
- DUBEAU F., JULIEN P.-O., POMAR C., 2004. Static multicriteria method for use in formulating diets for growing pigs. Proceedings (CD-Rom) of the 17<sup>th</sup> International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM 2004). Whistler, BC, 6-11 août 2004.
- 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.
- EMMANS G.C., 1981. Br. Soc. Anim. Prod., 103-110.
- FEDDES J. J. R., OUELLETTE C. A., LEONARD J. J., 2000. A system for providing protein for pigs in intermediately sized grower/finisher barns. Canadian Agricultural Engineering, 42, 209-213.
- 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.
- HENRY Y., 1974. Ann. Zootec., 23 (2), 171-184.
- 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, 291 p.
- JEAN DIT BAILLEUL P., RIVEST J., DUBEAU F., POMAR C., 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.
- KNAP P. W., ROEHE R., KOLSTAD K., POMAR C., LUITING P., 2003. Characterization of pig genotypes. J. Anim. Sci., 81 (E. Suppl. 2), E187-E195.
- KNOWLTON K. F., RADCLIFFE J. S., NOVAK C. L., EMMERSON D. A., 2004. Animal management to reduce phosphorus losses to the environment. J. Anim. Sci., 82, E173-195.
- KORNEGAY E.T. 2001. Pages 237-271. 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.
- LENIS N.P., 1989. Neth. J. Agri. Sci., 37, 61-70.

- NOBLET J., FORTUNE H., SHI X.S., DUBOIS S., 1994. *J. Anim. Sci.*, 72, 344-354.
- NRC. 1998. *Nutrient Requirements of Swine*. (10<sup>th</sup> ed.) National Academy Press, Washington, DC.
- PATIENCE J.F., THACKER P.A., DE LANGE C.F.M., 1995. *Swine Nutrition Guide*, 2<sup>nd</sup> Edition. University of Saskatchewan, Prairie Swine Center, Saskatoon.
- PEKAS J.C., 1983. *Appetite*, 4, 23-30.
- PIGEON S. 2001. Suivi des plans des interventions agroenvironnementales des fermes porcines du Québec. Rapport final présenté à Fédération des producteurs de porcs du Québec, février 2003 (Année de référence 2001). 99p.
- POMAR C., BARNETT G., 1994. Feeding strategies for fast growing lean pigs and its consequences on nitrogen pollution. A methodelling approach. Séminaire BASF. 29 mars 1994, Guelph, On et 30 mars 1994, Drummondville, Qc Canada.
- POMAR C., MATTE J. J., 1995. Effet de l'incorporation d'écaillés d'avoine dans l'aliment servi à volonté sur le rationnement en nutriments, la prise alimentaire et les performances de croissance du porc en finition. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, 27, 231-236.
- POMAR C., JEAN DIT BAILLEUL P., RIVEST J., 1996. Symposium « L'industrie porcine à l'affût de son environnement », St-Hyacinthe, Québec, faculté des sciences de l'agriculture et de l'environnement, Campus Macdonald de l'Université McGill, 11-22.
- POMAR C., DUBEAU F., LETOURNEAU MONTMINY M.P., MAHE M. et JUILIEN P.O., 2004. *Journées Rech. Porcine*, 36, 251-258.
- POULSEN, H.D., A.W. JONGBLOED, P. LATIMIER, J.A. FERNANDEZ. 1999. *Livest. Prod. Sci.* 58:251-259.
- ROY A., BERNIER J.F., POMAR C., 2000. *Journées Rech. Porcine en France*, 32, 227-233.
- SHELTON J.L., 2004. *J. Anim. Sci.*, 82, 2630-2639.
- WHITTEMORE C.T., ELSLEY F.W.H., 1976. *Practical pig nutrition*, Farming press limited, University of Edinburgh, 154-177.
- WHITTEMORE, C. T., GREEN D. M., KNAP P. W., 2001a. Technical review of the energy and protein requirements of growing pigs: food intake. *Anim. Sci.*, 73:, 3-17.
- VAN DER PEET-SCHWERING C.M.C., JONGBLOED A.W., AARNINK A.J.A., 1999. *Livest. Prod. Sci.*, 58, 213-224.