

La détermination des besoins nutritionnels, la formulation multicritère et l'ajustement progressif des apports de nutriments aux besoins des porcs : des outils pour maîtriser les rejets d'azote et de phosphore

C. POMAR¹, F. DUBEAU², J. Van MILGEN³

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, C.P. 90, Lennoxville, QC, Canada, J1M 1Z3

²Département de Mathématiques, Faculté des Sciences, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, J1K 2R1

³INRA, Agrocampus, UMR1079 Systèmes d'Élevage, Nutrition Animale et Humaine, F-35590 Saint-Gilles, France

Courriel : pomarc@agr.gc.ca

Bien que les animaux d'élevage aient amélioré dans les dernières années leurs performances zootechniques, ceux-ci ne fixent qu'une partie des nutriments contenus dans leurs aliments. Ainsi, seulement le tiers de l'azote (N) consommé, constituant de base des acides aminés et des protéines, est généralement retenu par le porc en croissance ; les deux tiers restant étant rejetés dans les fèces et les urines. Pour le phosphore (P), qui est principalement retenu dans les os, seulement 20 à 40% de ce qui est consommé est retenu, le reste se retrouvant dans les déjections. L'excrétion d'N et de P dépend de la quantité ingérée de ces nutriments, de leur absorption et de leur utilisation métabolique (Jongbloed et Lenis 1992).

L'accroissement de l'efficacité d'utilisation de l'N et du P alimentaires passe par une alimentation de précision qui permet un ajustement des apports nutritionnels aux besoins des animaux. Nous devons ainsi diminuer les fractions indisponibles pour le métabolisme animal ainsi que celles excédentaires sans toutefois nuire aux performances zootechniques et économiques de la production. Les éléments essentiels d'une alimentation de précision sont 1) l'évaluation du potentiel nutritif des ingrédients et l'amélioration de la digestibilité ou la disponibilité des nutriments, 2) la détermination précise des besoins en nutriments des animaux, 3) la formulation d'aliments équilibrés qui minimisent le rejet de nutriments, et 4) l'ajustement concomi-

tant des apports en nutriments aux besoins des animaux. Cet article décrit brièvement chacun de ces éléments ainsi que la manière avec laquelle ils vont permettre l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'N et du P. Nous insisterons plus particulièrement sur la détermination des besoins nutritionnels, la formulation multicritère et l'ajustement progressif des apports en nutriments aux besoins des animaux, ces facteurs étant ceux qui déterminent l'efficacité d'utilisation des nutriments et minimisent les rejets.

1 / Évaluation du potentiel nutritif des ingrédients

Il n'y a pas si longtemps les aliments et les besoins nutritionnels du bétail étaient caractérisés par leur contenu en nutriments totaux. Avec le temps, on a développé des techniques permettant de quantifier la fraction non disponible de ces nutriments et qui ne peut pas être utilisée par les animaux d'élevage. Le passage progressif d'une caractérisation du potentiel nutritif des matières premières et des besoins des animaux sur une base «totale» à «digestible», puis disponible ou nette, a permis la formulation d'aliments avec des apports nutritionnels plus adaptés aux besoins des animaux tout en évitant l'usage de marges de sécurité excessives. Les avantages et les limites des différentes méthodes d'évaluation ont été présentés pour l'énergie (Noblet *et al* 2003), les acides aminés (Stein *et al* 2007) et le phosphore (Jondreville et Dourmad 2005).

Une évaluation précise de la disponibilité de chaque nutriment est essentielle pour évaluer la valeur nutritionnelle des aliments de bétail et pour estimer les besoins de ces nutriments par les animaux. Cette évaluation présente cependant plusieurs difficultés. Une difficulté particulièrement importante est le choix d'une méthode d'estimation de la disponibilité de façon à ce qu'elle soit précise, facile à utiliser dans la pratique et que les apports nutritifs soient de nature additive dans les mélanges d'aliments du bétail. La mouture, les traitements thermiques et l'ajout d'enzymes sont des facteurs qui se doivent aussi d'être pris en compte lors de l'évaluation du potentiel nutritif des aliments.

2 / Déterminer avec précision les besoins nutritifs des animaux

Les besoins nutritionnels peuvent être définis comme étant la quantité de nutriments nécessaire pour optimiser un facteur de production, tel que la vitesse de croissance ou la conversion alimentaire. Chez les animaux en croissance, la quantité de protéines ou d'acides aminés nécessaire pour satisfaire leurs besoins est la somme des besoins d'entretien et de croissance. Ces quantités peuvent être exprimées en valeur disponible en tenant compte de l'efficacité d'utilisation des nutriments absorbés.

Traditionnellement, les besoins nutritionnels des animaux domestiques ont été publiés sous forme de tables. Puisque ces besoins sont influencés par la génétique, le sexe, le poids vif, le stade physiologique, l'appétit et les facteurs environnementaux (température, densité...), des modèles mathématiques sont de plus en plus utilisés pour tenir compte de tous ces facteurs (NRC 1998). Ces modèles doivent cependant être bien calibrés pour permettre d'estimer avec précision la quantité de nutriments qui permettra d'optimiser la croissance animale tout en minimisant les apports excédentaires de nutriments. Un aspect important d'une telle approche par modélisation est que la notion classique du besoin nutritionnel est complétée par une description de la réponse animale aux apports de nutriments. Ces modèles permettent de prendre en compte des interactions qui existent entre les nutriments et l'animal et à l'opposé des systèmes classiques avec des «valeurs-besoins» fixes, les résultats issus d'une démarche par modélisation sont rarement additifs. Ces modèles sont cependant confrontés à des problèmes complexes du fait que :

- les animaux peuvent suivre une trajectoire de consommation et de croissance différente de celle observée chez les porcs de génétique similaire élevés dans des fermes comparables, mais dans des conditions environnementales ou sanitaires particulières,
- les animaux sont élevés en groupes hétérogènes sur le plan de leur génétique, sexe, facteurs sanitaires ou pratiques d'élevage,
- les animaux sont alimentés collectivement par phases d'alimentation de durée variable.

Différents modèles mathématiques ont été développés dans le but d'estimer la croissance d'un porc unique dont le comportement dans des conditions normalisées d'élevage est considéré comme représentatif de toute une population. Ces modèles simulent la croissance ou estiment les besoins nutritionnels d'un individu représentatif d'une population à partir des informations collectées sur des populations d'animaux similaires. Ces informations servent à déterminer a priori les paramètres du modèle caractérisant ce représentant de la population et restent inchangés pendant la simulation. En conséquence, l'utilisateur de ces modèles se doit d'être très attentif d'une part aux différences entre les élevages et d'autre part aux changements qui peuvent apparaître au cours de la croissance,

deux facteurs qui peuvent modifier les besoins nutritionnels des animaux.

La réponse d'un individu à un traitement alimentaire est différente en forme et en ampleur de celle d'une population (Pomar *et al* 2003). L'utilisation de modèles simulant un seul animal peut conduire à des recommandations inappropriées en ce qui concerne les apports nutritionnels nécessaires à l'obtention des réponses désirées au niveau des populations (Pomar 2007, Van Milgen *et al* 2008). D'un autre côté, les modèles de populations proposés jusqu'à présent sont trop simples pour simuler avec précision la réponse des populations ou pour déterminer leurs besoins nutritionnels. De nouvelles approches sont proposées aujourd'hui caractérisant les porcs individuellement au sein d'une population en prenant en compte les relations entre les paramètres du modèle (Brossard *et al* 2006). Une fois la relation entre les paramètres du modèle établie (c'est-à-dire, la matrice de variance-covariance), ces informations peuvent être utilisées pour créer des populations virtuelles d'animaux basées sur le profil de l'animal moyen de la population. La variation aléatoire entre ces paramètres du modèle peut par la suite être ajoutée aux autres paramètres du modèle pour simuler la population. Cette approche permet de trouver le meilleur moment pour changer le régime alimentaire du point de vue économique et environnemental, de trouver la stratégie d'abattage optimale et de déterminer les apports de nutriments qui permettent d'optimiser un facteur de production (van Milgen *et al* 2008).

3 / Formuler des aliments équilibrés qui minimisent le besoin de nutriments

3.1 / La méthode traditionnelle de formulation des aliments

Formuler un aliment complet en production animale consiste à déterminer un mélange d'ingrédients qui satisfait les besoins en nutriments des animaux en accord avec les objectifs de production. Des étapes importantes de la formulation sont décrites dans les sections précédentes et incluent 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

est la méthode la plus fréquemment utilisée pour atteindre les objectifs de formulation. Ces objectifs concernent la détermination du niveau d'incorporation des ingrédients disponibles qui, en respectant une série de contraintes linéaires, minimise 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 (Sauvant *et al* 2004). Deux aliments complets sont considérés équivalents lorsqu'ils respectent toutes les contraintes imposées. Ce modèle minimise le coût du mélange sans considérer toutefois l'excès des nutriments.

Le problème traditionnel de formulation d'aliments est caractérisé par *a*) le vecteur de décision $x = (x_i)_{i \in I}$ où chaque élément x_i représente la quantité de l'ingrédient *i* (par exemple le maïs) de l'ensemble *I* des ingrédients disponibles, *b*) la matrice des coefficients $A = (a_{ij})_{i \in I, j \in J}$ où chaque a_{ij} représente la quantité du nutriment *j* (par exemple la lysine) dans l'ingrédient *i*, *c*) le vecteur $b = (b_j)_{j \in J}$ 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 et *d*) le vecteur $c = (c_i)_{i \in I}$ 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 :

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

sous les conditions

$$A\bar{x} = \begin{pmatrix} \sum_{i \in I} a_{i1} x_i \\ \sum_{i \in I} a_{i2} x_i \\ \vdots \\ \sum_{i \in I} a_{iJ} x_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_J \end{pmatrix} \text{ et } \bar{x} \geq 0.$$

Dans le système traditionnel de formulation $C = \sum_{i \in I} c_i x_i$ est la fonction objectif, la valeur c_i représente le prix par unité de poids de l'*i*ème ingrédient alors que *C* est le coût du mélange par unité de poids (€/T). Les caractéristiques principales de ce modèle découlent de la nature linéaire de la fonction objectif et de ses contraintes qui

exige la vérification des hypothèses suivantes :

- Additivité – la valeur de la fonction objectif est la somme des contributions de chaque ingrédient ; parallèlement, la contribution nutritionnelle d'un mélange d'ingrédients est la somme de la contribution en nutriments de chaque ingrédient ;
- Proportionnalité – la modification de la contribution d'un ingrédient dans un mélange change la valeur nutritionnelle et le coût du mélange dans la même proportion que le changement ;
- Divisibilité – l'incorporation d'un ingrédient dans un mélange est divisible indéfiniment.

En plus de ces hypothèses, la programmation linéaire impose la certitude, c'est-à-dire que les coefficients sont connus et constants. C'est telle que décrite dans cette section que la programmation linéaire est utilisée aujourd'hui pour formuler la majeure partie des aliments destinés au bétail. Cependant, il est important d'assurer la vérification de ces hypothèses lors du choix de la méthode d'estimation de la disponibilité des nutriments. Par exemple, la digestibilité iléale apparente des acides aminés ne satisfait pas la contrainte d'additivité, car la réponse animale à des niveaux croissants d'un acide aminé n'est pas linéaire (Stein *et al* 2007). Des valeurs digestibles iléales standardisées ont été proposées pour contourner ces limitations (Jondreville et Dourmad 2005, Stein *et al* 2007).

3.2. L'utilisation de contraintes environnementales ; le cas de l'azote, du phosphore, et de l'azote et du phosphore combinés

Dans le système traditionnel, nous avons vu que l'objectif est de minimiser le coût de la formulation tout en respectant les besoins des animaux. En utilisant les outils de la programmation multicritère, nous pouvons ajouter d'autres objectifs. Ainsi, nous pouvons ajouter des critères tenant compte des rejets d'N et de P. Ces critères s'écrivent : $c_i = p_i + \alpha r_{1,i}$ et $c_i = p_i + \beta r_{2,i}$. p_i est le prix unitaire de l'ingrédient ou 1 , $r_{1,i}$ est la quantité d'N excrété et $r_{2,i}$ est celle de P due à l' $i^{\text{ème}}$ ingrédient et α et β sont des coûts associés aux rejets d'N et de P, 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

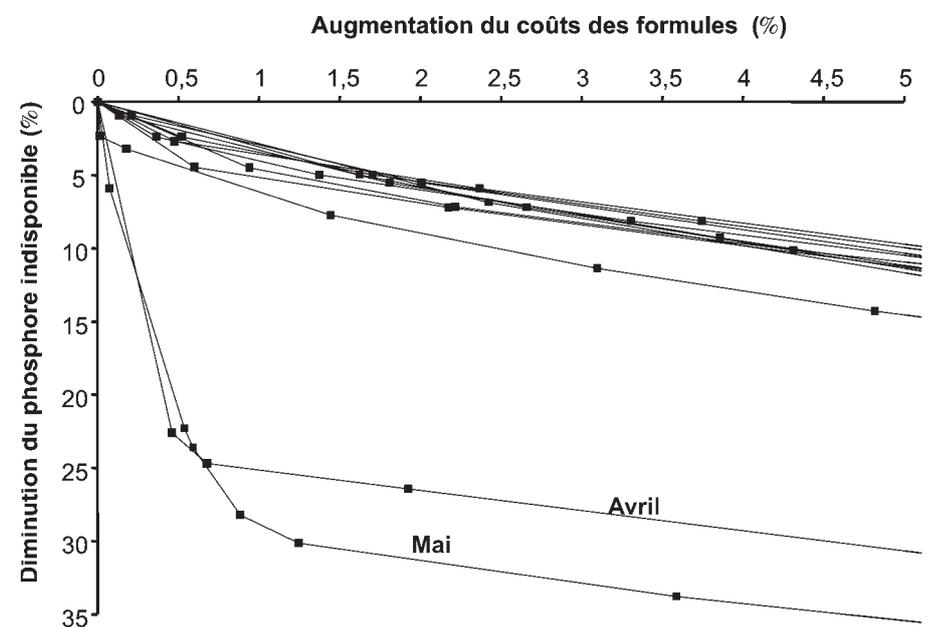
supplémentaire. On essaie alors de minimiser en même temps 2 ou 3 critères. Comme ces critères sont en général en opposition, diminuer un critère entraîne en général l'augmentation de l'autre. Par exemple, le coût du mélange augmente lorsque nous forçons la solution économiquement optimale à réduire davantage les apports d'N ou de P. Dans ce cas, les résultats montrent qu'il est possible de réduire sensiblement les rejets d'N avec une légère augmentation du coût de la formulation (Jean dit Bailleul *et al* 2001, Dubeau *et al* 2008). Nous observons également que la diminution des rejets d'N n'influence pas le niveau des rejets de P (Dubeau *et al* 2008).

Nous obtenons des résultats semblables à ceux observés pour l'N lorsqu'on ne tient compte que du coût de la formulation et des rejets de P (Chapoutot et Pressenda 2005, Pomar *et al* 2007a, Dubeau *et al* 2008). Plus particulièrement, l'augmentation du coût associé aux rejets azotés (α) entraîne une diminution de l'N excrété, mais aussi 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 souhaité restant constant. D'un autre côté, l'augmentation de β contraint à diminuer le P total des formules et le P excrété (figure 1). La méthode proposée est efficace pour diminuer l'excrétion d'N et de P dans le lisier, tout en maintenant

le coût des formules à un niveau acceptable. Par exemple, entre les mois de juin 2002 et mai 2003 en France, il était possible de réduire en moyenne de 5% les rejets de P avec des augmentations de coût de 1,5%. Néanmoins, 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 obtenues avec des augmentations du coût des aliments relativement faibles, comme nous l'avons observé pour les mois d'avril et mai 2003 (figure 1). La diminution des rejets de P lors de l'application de la méthode proposée s'ajoute à celle qui peut être obtenue avec l'ajout de phytase microbienne et végétale (Chapoutot et Pressenda 2005), car leurs effets sont additifs (Pomar *et al* 2007a). Cette méthode serait encore plus intéressante dans le contexte actuel de production dans lequel les coûts des matières premières, et en particulier celles riches en P comme les phosphates, ont augmenté considérablement.

Nous avons étudié l'impact sur les rejets d'N d'une diminution des rejets de P en imposant des contraintes environnementales sur ce dernier élément. Dans cette situation, comme cela avait été observé pour l'N, la diminution des rejets de P a peu d'effet sur le niveau d'N des aliments et sur ses rejets (Dubeau *et al* 2008). Les deux modèles bi-critères nous indiquent que dans la

Figure 1. Relation entre l'augmentation du coût du mélange et la diminution du P indisponible obtenue avec l'augmentation du coût associé aux rejets (β) en France de juin 2002 à mai 2003 (Pomar *et al* 2007a). Chaque trait dans ce graphique représente la réponse d'un mois pendant cette période.



majeure partie des situations les niveaux d'N et de P des aliments sont peu ou pas liés et que, par conséquent, on ne peut pas utiliser l'un de ces critères pour agir sur l'autre. Pour réduire l'excrétion d'N et de P simultanément, il devient donc nécessaire d'utiliser un modèle à trois critères dans lequel le coût des aliments et la concentration d'N et de P seront considérés simultanément. L'absence d'interaction entre ces deux éléments dans la majeure partie des situations rend l'application de la méthode relativement simple.

La méthode utilisée s'est avérée efficace pour diminuer l'excrétion d'N et de P dans le lisier, tout en maintenant le coût des formules à un niveau acceptable. Il est cependant important de noter que l'efficacité de cette méthode est fortement dépendante du coût des matières premières. Ainsi, des réductions importantes des rejets de P peuvent parfois être obtenues avec des augmentations du coût des aliments relativement faibles, alors que dans d'autres conjonctures économiques les augmentations de coûts associées à la diminution des rejets peuvent être plus importantes. L'avantage de cette méthode réside cependant 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. Le producteur pourrait par exemple choisir les niveaux de réduction en relation avec ses coûts de gestion des lisiers produits et changer le niveau de réduction en fonction du coût des ingrédients.

4 / Ajustement progressif des apports en nutriments aux besoins des animaux

La concentration optimale de nutriments dans les aliments diminue progressivement au cours de la croissance (NRC 1998). Par conséquent, une façon de diminuer les rejets d'N et de P est d'ajuster de façon concomitante les apports en fonction des besoins des animaux tout au long de la croissance. Cette pratique est d'autant plus avantageuse sur le plan économique et environnemental que le nombre de phases d'alimentation augmente, tel que simulé par Letourneau Montminy *et al* (2005) et démontré par Pomar *et al*

(2007b). Augmenter le nombre de phases d'alimentation peut cependant s'avérer difficile à mettre en œuvre et entraîne parfois une augmentation du coût des installations. La production de porcs avec des systèmes d'alimentation à deux et trois phases d'alimentation reste donc pratique courante. Le développement de systèmes d'alimentation permettant de mélanger et de distribuer automatiquement deux prémélanges qui, combinés en proportions variables, pourront satisfaire les besoins des animaux tout au long de leur croissance (Feddes *et al* 2000) rend cette technique intéressante, car elle permet d'augmenter le nombre de phases sans toutefois augmenter le coût des installations ou de l'alimentation (Letourneau Montminy *et al* 2005). 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 qui relève de l'optimisation globale et qui nécessite des algorithmes de résolution plus complexes. Ce problème a été partiellement résolu par Letourneau Montminy *et al* (2005) en modifiant l'algorithme de formulation pour formuler les deux prémélanges simultanément permettant ainsi de déterminer la proportion optimale de ces deux prémélanges pendant l'ensemble de la croissance. La modélisation mathématique devient l'outil de choix dans la mise en place de cette démarche (van Milgen *et al* 2008). Il est cependant aussi possible d'utiliser deux prémélanges formulés indépendamment de façon à ce que le premier puisse répondre aux besoins nutritionnels des animaux les plus exigeants, soit ceux au début de la période d'alimentation, pendant que le second est formulé pour répondre aux besoins des animaux les moins exigeants peu avant leur départ pour l'abattoir. Les prémélanges ainsi formulés peuvent être mélangés dans des proportions qui varient quotidiennement à l'aide d'un système automatique d'alimentation. Dans ce cadre, il a été montré que l'alimentation multi-phase avec un ajustement quotidien du mélange ne semble pas modifier la consommation totale d'aliment, mais les animaux consomment moins de protéines ce qui permet de réduire les rejets d'N de 12% par rapport à un système d'alimentation à trois phases (Pomar *et al* 2007b). Des réductions similaires ont été obtenues par simulation (van Milgen *et al* 2008). Dans l'étude précédente, le gain moyen quo-

tidien n'a pas été affecté par le nombre de phases, mais les porcs nourris selon un plan d'alimentation en multi-phase quotidienne avaient déposé la même quantité de protéines corporelles et 8% de lipides en plus.

Conclusion

Dans le contexte actuel de production porcine, il devient nécessaire d'intégrer l'ensemble des méthodes permettant 1) de bien caractériser le potentiel nutritif des matières premières, 2) de déterminer de façon précise les besoins nutritifs des animaux, 3) de formuler des aliments qui répondent à ces besoins et qui utilisent des additifs favorisant la digestibilité des minéraux, permettant ainsi de minimiser l'excès des fractions des nutriments qui ne sont pas disponibles pour l'animal, et 4) d'ajuster progressivement les apports en nutriments aux besoins des animaux. La détermination des apports nutritionnels qui optimiseront le système de production exige des modèles de simulation bien calibrés. Une fois ces derniers bien établis, la formulation d'aliments avec des contraintes environnementales est une technique simple et qui permet des réductions importantes des rejets d'N et de P avec des augmentations du coût des aliments relativement faibles. Il est cependant nécessaire d'accroître nos connaissances et d'améliorer nos méthodes de calcul pour s'assurer que les aliments proposés seront ceux qui optimiseront nos systèmes de production en ce qui concerne l'animal, les coûts de production et l'environnement. La détermination précise des apports nutritionnels permettant d'optimiser la réponse des porcs nourris en groupe et l'ajustement progressif de ces apports aux besoins décroissants des animaux sont des aspects qui méritent d'être améliorés afin d'optimiser l'efficacité alimentaire des porcs de demain.

L'alimentation de précision contribuera de façon importante à la maîtrise de l'impact des productions animales sur l'environnement. Cependant, ce problème dépasse le cadre d'une optimisation linéaire et monocritère. Le fait que la réponse animale aux apports alimentaires n'est pas linéaire et que les aliments sont formulés pour des groupes d'animaux hétérogènes rendent la détermination de la ration «optimale» une démarche complexe qui nécessite la mise en place de nouvelles méthodes de calcul et d'optimisation.

Références

- Brossard L., van Milgen J., Lannuzel P.Y., Bertinotti R., Rivest J., 2006. Analyse des relations entre croissance et ingestion à partir de cinétiques individuelles : implications dans la définition de profils animaux pour la modélisation. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, 38, 217-224.
- Chapoutot P., Pressenda F., 2005. Conséquences des nouveaux «systèmes d'unités phosphore» sur la formulation des régimes. *Numéro Spécial Phosphore. INRA Prod. Anim.*, 18, 209-228.
- Dubeau F., Julien P.O., Pomar C., 2008. Étude de cas : un porcin dans un environnement sain. *INFOR*, 46.
- Feddes J.J.R., Ouellette C.A., Leonard J.J., 2000. A system for providing protein for pigs in intermediately sized grower/finisher barns. *Can. Agric. Engin.*, 42, 209-213.
- Jean dit Bailleul P., Rivest J., Dubeau F., Pomar C., 2001. Reducing nitrogen excretion in pigs by modifying the traditional least-cost formulation algorithm. *Livest. Prod. Sci.*, 72, 199-211.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *Numéro Spécial Phosphore. INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.
- Jongbloed A.W., Lenis N.P., 1992. Alteration of nutrition as a means to reduce environmental pollution by pigs. *Livest. Prod. Sci.*, 31, 75-94.
- Letourneau Montminy M.P., Boucher C., Pomar C., Dubeau F., Dussault J.P., 2005. 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. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, 37, 25-32.
- Noblet J., Bontems V., Tran G., 2003. Estimation de la valeur énergétique des aliments pour le porc. *INRA Prod. Anim.*, 16, 197-210.
- NRC, 1998. Nutrient requirements of swine. 10th Edition. National Academy Press, Washington, DC, 211p.
- Pomar C., 2007. Predicting responses and nutrient requirements in growing animal populations: The case of the growing-finisher pig. In: *Mathematical modeling in nutrition and agriculture*. Hanigan M.D., Novotny J.A., Marsteller C.L. (Eds), Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, VA, 309-330.
- Pomar C., Kyriazakis I., Emmans G.C., Knap P.W., 2003. Modeling stochasticity: Dealing with populations rather than individual pigs. *J. Anim. Sci.*, 81 (Suppl. 2), E178-E186.
- Pomar C., Dubeau F., Letourneau Montminy M.P., Boucher C., Julien P.O., 2007a. Reducing phosphorus concentration in pig diets by adding an environmental objective to the traditional feed formulation algorithm. *Livest. Sci.*, 111, 16-27.
- Pomar C., Pomar J., Babet D., Dubeau F., 2007b. Effet d'une alimentation multiphase quotidienne sur les performances zootechniques, la composition corporelle et les rejets d'azote et de phosphore du porc charcutier. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, 39, 23-30.
- Sauvant D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. INRA Editions, Paris, France, 301p.
- Stein H.H., Sève B., Fuller M.F., Moughan P.J., de Lange C.F.M., 2007. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: Terminology and application. *J. Anim. Sci.*, 85, 172-180.
- Van Milgen J., Brossard L., Dourmad J.Y., 2008. Using InraPorc to reduce nitrogen and phosphorus excretion. In: *Recent advances in animal nutrition*. Garnsworthy P.C., Wiseman J. (Eds). University Press, Nottingham, UK, sous presse.

Résumé

Dans un contexte dans lequel le coût élevé des matières premières et l'utilisation de sources non renouvelables de phosphates sont des enjeux majeurs pour les productions animales, l'alimentation de précision est proposée comme une démarche essentielle à l'accroissement de l'efficacité d'utilisation de l'azote et du phosphore alimentaire, et par conséquent, une réduction de leur excrétion. Une alimentation de précision requiert de bien caractériser le potentiel nutritif des aliments, de déterminer avec précision les besoins nutritionnels des animaux, de prédire la réponse animale aux apports nutritionnels, de formuler d'aliments avec des contraintes environnementales, et d'ajuster progressivement les apports aux besoins décroissants des animaux. La mise en place d'une telle stratégie d'alimentation demande cependant d'accroître nos connaissances et d'améliorer nos méthodes de calcul afin de s'assurer que les formules alimentaires proposées soient celles qui optimiseront nos systèmes de production tant d'un point de vue animal, économique qu'environnemental.

Abstract

Determination of nutritional needs, multicriteria formulation and progressive adjustment of nutrients to pig needs: tools for controlling nitrogen and phosphorus waste

Precision feeding is proposed as an essential approach to improve the utilisation of dietary nitrogen and phosphorous, and thus reduce nutrient excretion in a context in which the high cost of feed ingredients and the use of non-renewable sources of phosphate are major challenges for the livestock industry. Precision feeding requires accurate knowledge of the nutritional value of feedstuffs and nutrient requirements, formulating diets with environmental constraints, and the gradual adjustment of nutrient supply in order to follow the decreasing requirements of animals during growth. Nevertheless, it is necessary to increase our knowledge and improve current calculation methods to ensure that the proposed feed formulas are those that optimize the production system from different perspectives (*i.e.*, the animal, economy and environment).

POMAR C., DUBEAU F., VAN MILGEN J., 2009. La détermination des besoins nutritionnels, la formulation multicritère et l'ajustement progressif des apports de nutriments aux besoins des porcs : des outils pour maîtriser les rejets d'azote et de phosphore. *Inra Prod. Anim.*, 22, 49-54.

