

# InraPorc : un modèle pour analyser les performances et évaluer les stratégies alimentaires chez le porc en croissance

*Jaap VAN MILGEN, Jean NOBLET, Alain VALANCOGNE, Serge DUBOIS, Jean-Yves DOURMAD*

*INRA - UMR Veau et Porc  
Domaine de la Prise, 35590 Saint Gilles*

## **InraPorc : un modèle pour analyser les performances et évaluer les stratégies alimentaires chez le porc en croissance**

L'alimentation animale doit faire face à des défis nouveaux et complexes qui nécessitent une approche plus intégrative. Même si des progrès considérables ont été réalisés dans ce domaine, l'application de cette connaissance reste encore limitée. Le but du projet InraPorc est d'intégrer l'ensemble des informations actuellement disponibles dans un modèle nutritionnel du porc en croissance et de la truie, afin de les rendre accessibles pour l'utilisateur. L'objectif du modèle de croissance est d'analyser l'utilisation des nutriments par l'animal et d'évaluer les conséquences de stratégies alimentaires différentes. Les paramètres liés à la consommation d'aliment et au potentiel de croissance des animaux sont ajustés par l'utilisateur, ce qui implique que la croissance (dans l'absolu) n'est pas réellement prédite. Le modèle est basé sur la transformation des nutriments en protéines et lipides corporels. Ces derniers sont ensuite utilisés pour prédire le poids vif et des critères corporels tels que la TVM. Le métabolisme des nutriments est essentiellement basé sur des concepts comme l'énergie nette ou la protéine idéale. Les forces motrices du modèle incluent la consommation d'aliment, la répartition de l'énergie entre protéines et lipides, et la disponibilité de protéines et d'acides aminés alimentaires. La validation du modèle par des données issues de la littérature suggère qu'il est capable de prédire les conséquences d'une restriction alimentaire. Néanmoins, une légère surestimation du dépôt de lipides est observée. Une version informatisée du modèle sera disponible courant 2005. Le développement futur du modèle concernera la qualité des produits, la prise en compte de l'environnement climatique de l'animal et l'extrapolation du modèle au niveau d'une population.

## **InraPorc: a model to analyze performance and to evaluate nutritional strategies in growing pigs**

Animal nutrition is now facing new challenges that call for a more integrative approach. Although considerable research progress has been made in this area, application in the field has been rather limited. The objective of the project InraPorc is to integrate the current state of knowledge in a nutritional model for growing pigs and sows, and make it available to end-users. The objective for the growing pig model is to analyze nutrient utilization by the animal and to evaluate the effects of using different nutritional strategies. As model parameters related to feed intake and growth potential are adjusted by the model user, growth (in an absolute sense) is not really predicted. The model is based on the transformation of dietary nutrients to body protein and lipid, which are then used to predict body weight and criteria such as lean body mass. Metabolism of nutrients is mostly based on concepts used in net energy and ideal protein systems. Driving forces of the model include feed intake, the partitioning of energy between protein and lipid deposition, and availability of dietary protein and amino acids. Using literature data, the model appeared well capable of predicting the consequence of a feed restriction. However, there was a small but consistent over-estimation of lipid deposition. A software version of the model will be made available in 2005. Future development will include issues of product quality, the thermal environment of the animal, and up scaling the model to the population level.

## INTRODUCTION

Les systèmes d'alimentation, comme l'énergie nette ou les acides aminés digestibles standardisés, sont largement utilisés en nutrition animale. Ces systèmes sont basés sur le principe d'additivité, les valeurs alimentaires et les besoins étant exprimés sur la même base. A ces systèmes nutritionnels viennent s'ajouter maintenant d'autres critères d'évaluation comme la qualité des produits, le bien-être animal et l'environnement (SAUVANT, 1992). La multiplication des critères à prendre en compte a pour conséquence qu'on doit s'interroger sur des relations et interactions qui existent entre ces critères. La démarche systémique (dont la modélisation est une formalisation) est particulièrement adaptée pour étudier des systèmes en plusieurs dimensions. Or, même si le progrès réalisé en modélisation est considérable, les retombées en dehors d'un contexte de recherche restent encore modestes. Certains programmes de recherche menés dans notre laboratoire ont pour but d'intégrer notre savoir-faire dans des modèles et de les rendre opérationnels pour une utilisation plus large. L'objectif du travail rapporté ici est de présenter les principes d'un modèle de croissance du porc basé sur des concepts nutritionnels. Courant 2005, un logiciel qui intégrera les concepts présentés sera disponible.

### 1. DESCRIPTION DU MODELE

#### 1.1. Les principes

Le modèle décrit ci-après n'a pas l'ambition de prédire les performances dans l'absolu. En effet, la croissance est un phénomène complexe orchestré conjointement par une régulation de la consommation et une régulation de l'utilisation des nutriments. Cette complexité nous a amené à choisir une stratégie où l'utilisateur du modèle doit dans un premier temps caractériser l'animal dans une situation où il peut exprimer son potentiel de croissance et qui prenne en compte les effets du milieu d'élevage. Cette caractérisation a pour objectif de calibrer les paramètres du modèle afin que les valeurs prédites correspondent aux observations. Dans un deuxième temps, le modèle peut être utilisé pour analyser la répartition des nutriments entre les différentes fonctions et surtout de prédire les conséquences de modifications des stratégies alimentaires.

L'ingestion est la force motrice la plus importante du modèle, l'apport des nutriments digestibles étant pris comme point de départ ; le niveau de consommation n'est pas prédit mais constitue une entrée du modèle. L'utilisation métabolique de ces nutriments est fortement inspirée des notions classiques de l'utilisation de l'énergie (EM et EN) et de l'utilisation des acides aminés (protéine idéale).

La digestibilité fécale est utilisée comme base de l'apport énergétique. L'énergie digestible est calculée à partir des apports de protéines digestibles (dMAT), de lipides digestibles (dLIP), d'amidon (AMIDON), de sucres (SUCRES) et de résidu digestible (dRESIDU). Ce dernier critère, qui représente essentiellement des fibres digestibles, est calculé comme la différence entre la matière organique digestible et l'apport digestible des quatre autres nutriments. L'amidon et les

sucres sont supposés digestibles à 100 %. L'apport d'acides aminés (et de protéines) est calculé à partir de la digestibilité idéale standardisée ( $\zeta$  à d, corrigée pour les sécrétions endogènes basales). Douze acides aminés essentiels (y compris l'arginine), les ensembles méthionine plus cystine et phénylalanine plus tyrosine et l'apport de protéines digestibles (au niveau idéal) sont considérés. Les données utilisées par défaut dans le modèle sont celles des Tables INRA-AFZ (SAUVANT et al, 2002)

L'utilisation métabolique des nutriments digestibles résulte en un dépôt de protéines (PD) et un dépôt de lipides corporels (LD). Ces deux dépôts se cumulent quotidiennement dans deux compartiments : la masse de protéines (P ; kg) et la masse de lipides (L ; kg). Le poids vif vide (PVV ; kg) et le poids vif (PV ; kg) sont ensuite calculés à partir de P et L selon des équations obtenues d'après les données de QUINIOU et NOBLET (1995) :

$$\begin{aligned} PVV &= 5,8302 \times P^{0,946} + 0,9697 \times L^{0,946} \\ PV &= 0,890 \times PVV^{1,014} \end{aligned}$$

A partir de prédictions de P et L, d'autres critères (comme le rendement carcasse, le TVM et l'épaisseur de lard dorsal) sont estimées par des équations empiriques.

#### 1.2. Utilisation de l'énergie

Les valeurs énergétiques d'un aliment chez le porc en croissance peuvent être calculées à partir des nutriments digestibles (NOBLET et al, 1994 ; NOBLET et al, 2003) :

$$ED = 23,31 \times dMAT + 39,00 \times dLIP + 17,45 \times AMIDON + 16,62 \times SUCRES + 16,61 \times dRESIDU$$

$$EM = 20,34 \times dMAT + 39,00 \times dLIP + 17,45 \times AMIDON + 16,62 \times SUCRES + 15,51 \times dRESIDU$$

$$EN = 12,08 \times dMAT + 35,01 \times dLIP + 14,32 \times AMIDON + 11,94 \times SUCRES + 8,64 \times dRESIDU$$

Il est admis que ces valeurs ne sont pas uniquement fonction de l'aliment, mais aussi de l'animal. Par exemple, les truies ont une capacité digestive plus importante que les porcs en croissance (notamment pour les fibres) et il en résulte des valeurs énergétiques différentes pour la truie et le porc en croissance (SAUVANT et al, 2002). Egalement, les valeurs EN et EM des protéines digestibles dépendent de leur utilisation par l'animal. Le rapport EM/ED est égal à 1 pour la fraction des protéines digestibles déposées sous forme de protéines corporelles et uniquement la fraction des protéines digestibles non retenues contribue à l'excrétion de l'énergie dans l'urine.

La figure 1 illustre la façon dont le modèle considère l'utilisation de l'énergie. A partir de la valeur ED de chacun de ces cinq nutriments, les équivalents en EM et EN sont calculés. Pour les lipides, l'amidon, les sucres et le résidu, les rendements d'utilisation de l'ED sont calculés à partir des équations indiquées ci dessus ( $\zeta$  à d, le rendement est égal au rapport entre les coefficients de régression). Pour les lipides,

l'amidon et les sucres, ces rendements sont égaux à 100 % alors que pour le résidu le rendement équivaut à 93,4 % (6,6 % sont perdus, notamment sous forme de méthane). Une partie de l' $ED_{MAT}$  est déposée sous forme de protéines, alors que le complément doit être désaminé pour le rendre utilisable pour l'animal. L'énergie urinaire qui en résulte est basée sur une composante basale et sur l'excès protéique (LE GOFF et NOBLET, 2001). L' $EM_{excès\ MAT}$  est ensuite calculée comme la différence entre l' $ED_{MAT}$ , l'énergie de PD et l'énergie excrétée dans l'urine.

Les rendements d'utilisation de l'EM pour les lipides, l'amidon, les sucres et le résidu sont calculés à partir des coefficients de régression précédemment cités. Pour  $EM_{excès\ MAT}$ , un rendement de 52 % est utilisé (VAN MILGEN et al, 2001). Toute l'énergie non transformée en EN est perdue sous forme de chaleur. La somme de  $EN_{lipides}$ ,  $EN_{amidon}$ ,  $EN_{sucres}$ ,  $EN_{résidu}$  et  $EN_{excès\ MAT}$  constitue une réserve énergétique (EN-hors-PD) qui est utilisée pour des processus impliquant un besoin en énergie (entretien, activité physique, coût de dépôt de protéines) ou pour LD.

### 1.3. Les besoins énergétiques

L'ensemble des besoins énergétiques est exprimé sur une base EN (figure 1). Les besoins énergétiques pour l'entretien sont généralement calculés à partir de la production de chaleur à jeun (FHP ; avec une activité physique nulle). Alors que dans le système EN (NOBLET et al, 1994), la FHP dépend seulement du PV de l'animal ( $FHP = 750 \text{ kJ}/(\text{kg PV})^{0,60}/\text{j}$ ), des résultats récents de notre laboratoire indiquent qu'elle dépend aussi du niveau alimentaire. Une compilation de ces résultats montre ainsi que FHP (hors

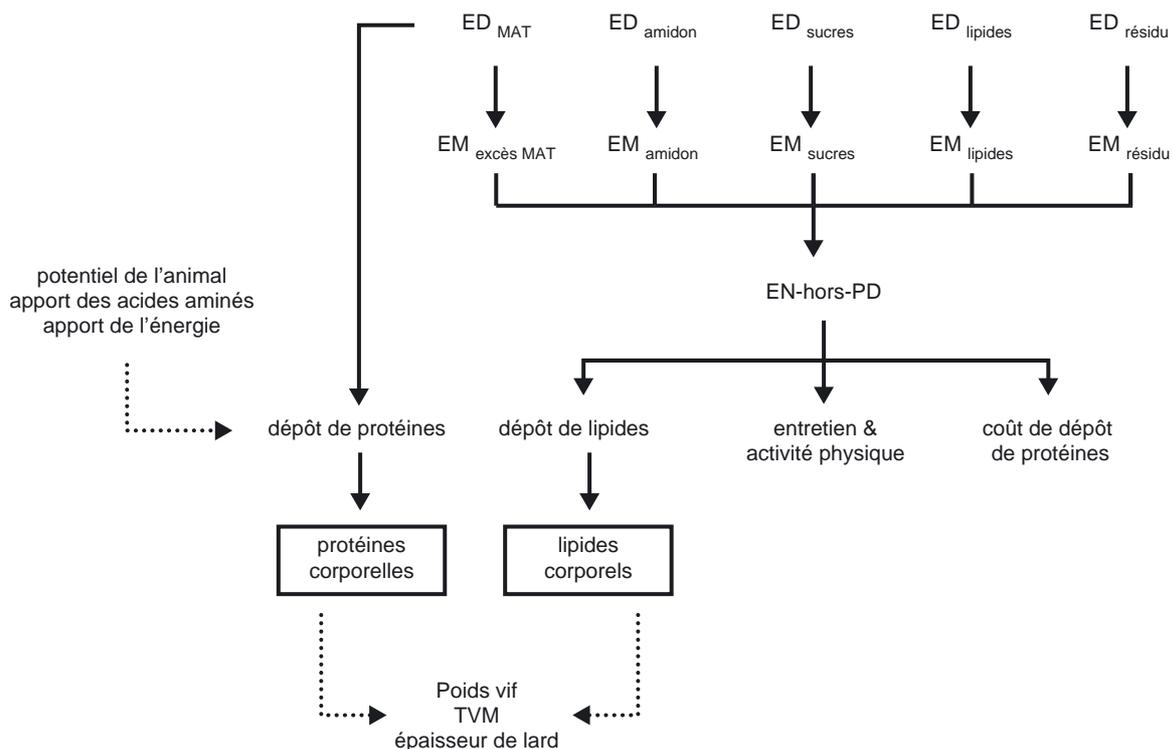
activité physique) chez le porc en croissance varie avec l'EN ingéré selon l'équation suivante :

$$FHP = 436 + 0,75 \times \text{EN ingérée}$$

avec FHP et EN ingérée exprimées en  $\text{kJ}/(\text{kg PV})^{0,60}/\text{j}$ . Comme indiqué par VAN MILGEN et al (2001), la FHP n'est qu'un indicateur de l'entretien. Le besoin énergétique pour l'entretien mesuré à jeun (comme c'est le cas pour la FHP) est couvert par des réserves corporelles. Or, à l'état nourri, ce besoin est couvert par l'aliment. L'efficacité d'utilisation de l'énergie des réserves corporelles pour couvrir le besoin d'entretien a été estimée à 0,616 (VAN MILGEN et al, 2001). La FHP multipliée par ce rendement correspond à l'équivalent en EN (fourni par l'aliment) pour couvrir le besoin d'entretien. Le coût énergétique de l'activité physique est calculé à partir de données de VAN MILGEN et al (2001) et correspond à  $51,7 \text{ kJ EN}/(\text{kg PV})^{0,60}/(\text{h debout})$ . Par défaut, il est supposé que les animaux sont debout 4 h par jour.

Le coût énergétique associé à PD (les coûts de synthèse et de turnover du PD) est estimé à 0,484 ( $\text{kJ EN}/(\text{kJ PD})$ ) (VAN MILGEN et al, 2001). Comme les pertes de chaleur lors du passage de l'EM à l'EN, ce coût fait partie de l'extrachaleur. Il est important de souligner que ce chiffre correspond seulement au coût lié au dépôt de protéines (PD); le coût énergétique lié au turnover de protéines corporelles est en effet inclus dans l'entretien.

L'entretien, l'activité physique et le coût énergétique de PD sont prioritaires pour utiliser l'EN-hors-PD. Toute l'énergie restante est ensuite déposée sous forme de lipides. Il résulte de cette approche une forte liaison entre les valeurs utilisées



**Figure 1** - Représentation de la répartition de l'énergie chez le porc en croissance (—> flux de matière ; .....> relation).

pour l'entretien et celles obtenues pour LD. Même si plusieurs facteurs sont déjà pris en compte par le modèle dans l'estimation de l'entretien, il peut en exister d'autres (comportement, état de santé, ...). Pour prendre en compte ces effets, l'ensemble constitué de l'entretien et l'activité physique peut être ajusté par l'utilisateur par le biais d'un facteur de correction (valeur par défaut ENTRETIEN = 1). L'augmentation de l'ENTRETIEN augmente la dépense énergétique pour l'entretien au dépens de LD, une réduction ayant l'effet inverse.

#### 1.4. Le potentiel de performance de l'animal

Pour caractériser le potentiel de l'animal, nous considérons qu'il est en situation d'exprimer son potentiel génétique dans son environnement d'élevage, sans contraintes alimentaire, climatique ou sanitaire.

La consommation à volonté est considérée comme une caractéristique de l'animal. La régulation de la consommation à volonté est un sujet complexe car l'ingestion peut être régulée par des mécanismes métaboliques et/ou digestifs. Le mode d'expression (en quantité, ED, EM, ou EN ingérée) est laissé au choix de l'utilisateur, ce qui n'est pas sans conséquence en termes de réponse de l'animal à l'utilisation de régimes présentant différentes densités énergétiques. Par exemple, si l'utilisateur estime que la consommation à volonté est régulée par l'encombrement digestif (ç à d, une régulation par la quantité ingérée), la distribution d'un régime plus riche en énergie aura pour conséquence d'augmenter la consommation d'EN (pour la même quantité d'aliment ingéré) avec comme résultat une amélioration des performances. Par contre, si l'utilisateur estime que la consommation à volonté est régulée en fonction de l'EN, des régimes avec différents teneurs en EN apporteront la même quantité d'EN (pour des quantités ingérées différentes) et permettront donc des performances similaires.

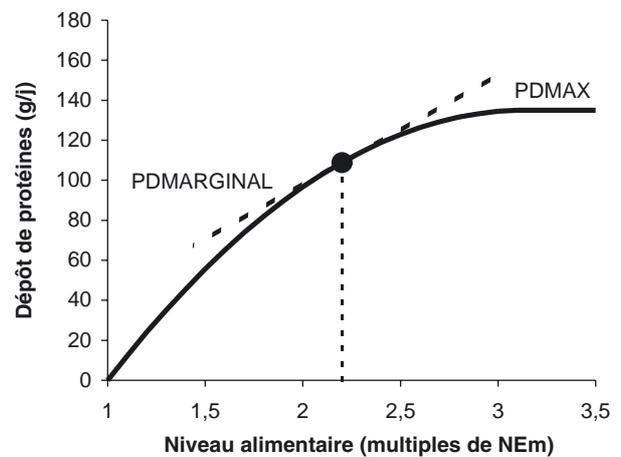
Le PD (dans des conditions optimales) est décrit par une fonction de Gompertz. Cette fonction sigmoïdale compare l'état actuel de l'animal (ç à d, la masse des protéines corporelles) par rapport à un état prévu. Au lieu de paramétrer cette fonction par la masse de protéines corporelles à la maturité, nous utilisons la moyenne du dépôt de protéines entre le début et la fin d'une simulation (PDMOYEN). De plus, cette paramétrisation permet de changer la forme de la courbe de croissance (à l'aide d'un paramètre nommé PRECOCITE) sans changer la moyenne du dépôt de protéines.

#### 1.5. Réponse à une restriction énergétique

Il est bien connu qu'une restriction énergétique peut réduire PD, même si l'apport en acides aminés et protéines reste suffisant pour le maintenir. Dans un des premiers modèles de croissance du porc, WHITTEMORE et FAWCETT (1974) ont proposé une relation linéaire-plateau entre l'apport d'énergie et PD. Dans cette relation, le plateau est indicatif de la capacité (génétique) maximale de l'animal à déposer des protéines (PDMAX) et la pente correspond à la baisse de PD lors d'une restriction énergétique. Dans la littérature, il existe plusieurs théories qui décrivent la force motrice qui pilote la réponse à une restriction énergétique (par exemple, le main-

tien d'un ratio minimal entre LD et PD, ou entre L et P). Au lieu d'utiliser le modèle linéaire-plateau, nous utilisons un modèle curvilinéaire-plateau pour décrire la relation entre PD et l'énergie ingérée (VAN MILGEN et al, 2000). La figure 2 montre ce concept pour un stade donné. La consommation à volonté ainsi que le PD correspondant (le point sur la figure 2) ont déjà été décrits ci-dessus. Le dépôt de protéines marginal (PDMARGINAL) est défini comme le changement de PD dû au changement de l'apport d'énergie. L'ensemble des informations concernant la consommation, PD et PDMARGINAL d'un animal nourri à volonté suffit alors pour décrire la réponse à une restriction énergétique dans le modèle curvilinéaire-plateau (figure 2).

Il est généralement admis que des animaux en début de croissance sont plus sensibles à une restriction énergétique que des porcs en finition. A 20 kg de PV la valeur de PDMARGINAL est fixée à 8,4 g PD/MJ EN. Au cours de la croissance, elle diminue ensuite linéairement avec le PV, jusqu'au PV (PVPDMAX) pour lequel l'animal est capable de consommer suffisamment d'énergie pour atteindre le plateau du PD (et donc PDMARGINAL = 0). Cependant il semble que certains génotypes récents n'arrivent pas jamais à consommer suffisamment pour atteindre le PDMAX. Dans ce cas, PVPDMAX a une valeur très élevée, ce qui assurera une réponse quasi-linéaire à l'apport énergétique.



**Figure 2** - Effet de l'apport énergétique sur le dépôt de protéines chez le porc en croissance (dépôt de protéines pour un animal nourri à volonté ●).

#### 1.6. Réponse aux acides aminés et aux protéines

Au même titre que l'énergie, les apports d'acides aminés et de protéines digestibles peuvent limiter le PD. Pour le prendre en compte, nous avons volontairement pris une démarche qui reste assez proche du concept de la protéine idéale, dans lequel les besoins en acides aminés essentiels sont exprimés par rapport au besoin en lysine (SÈVE, 1994). Cependant, une limite de ce concept est le fait qu'il s'agit d'une approche globale qui ne distingue pas l'utilisation des acides aminés pour des fonctions différentes (entretien, crois-

**Tableau 1** - Caractéristiques de l'utilisation des acides aminés et protéines pour la croissance. Le rendement d'utilisation est obtenu par calcul "renversé" du profil idéal en acides aminés

	Entretien			Composition du PD <sup>3</sup>	Protéine idéale <sup>4</sup>	Rendement d'utilisation
	Désquamation <sup>1</sup>	Turnover <sup>1</sup>	Endogène basale <sup>2</sup>			
	mg/kg PV <sup>0,75</sup> /j	mg/kg PV <sup>0,75</sup> /j	g/kg MS ingérée	%	%	%
Lysine	4,5	23,9	0,313	6,96	100	72
Méthionine	1,0	7,0	0,087	1,88	30	64
Cystine	4,7	4,7	0,140	1,03	30	37
Thréonine	3,3	13,8	0,330	3,70	65	61
Tryptophan	0,9	3,5	0,117	0,95	18	57
Isoleucine	2,5	12,4	0,257	3,46	60	60
Leucine	5,3	27,1	0,427	7,17	100	76
Valine	3,8	16,4	0,357	4,67	70	71
Phénylalanine	3,0	13,7	0,273	3,78	50	82
Tyrosine	1,9	9,0	0,223	2,86	45	67
Histidine	1,3	10,2	0,130	2,79	32	93
Arginine	0,0	0,0	0,280	6,26	42	154
Protéines	104,4	361,1	8,517	-	-	85

<sup>1</sup> D'après MOUGHAN (1998), Tableau 13.4

<sup>2</sup> D'après INRA-AFZ (SAUVANT et al, 2002)

<sup>3</sup> D'après LE BELLEGO et NOBLET (2002)

<sup>4</sup> D'après SÈVE (1994)

sance, ...). C'est pourquoi des adaptations y ont été apportées en distinguant les besoins pour l'entretien et pour la croissance. Trois composantes sont considérées dans le besoin en acides aminés pour l'entretien : la desquamation de la peau, les pertes liées au turn-over basal des protéines et les pertes associées à l'endogène basal. Pour la desquamation de la peau et les pertes du turn-over basal, le profil en acides aminés proposé par MOUGHAN (1998) est utilisé, alors que pour les pertes endogènes, nous avons retenu les valeurs retenues pour les tables INRA-AFZ (SAUVANT et al, 2002). Les besoins en acides aminés pour l'entretien sont fonction du PV pour la desquamation et le turn-over alors que l'endogène basal varie avec la consommation de matière sèche. Il est supposé que l'efficacité de synthèse pour l'entretien est égale à 100 %. Vu la grande incertitude concernant ces valeurs (cf. les valeurs de FULLER et al, 1989) et la contribution relativement faible de l'entretien aux besoins totaux, nous estimons que cette hypothèse a peu d'influence sur l'estimation des besoins en acides aminés.

La quantité d'acides aminés disponibles est calculée comme la différence entre l'apport digestible standardisé et les besoins pour l'entretien. Pour déterminer si l'apport d'un acide aminé limite le PD, nous calculons le rendement (maximal) de l'utilisation pour chaque acide aminé. Nous avons déterminé ce rendement maximal par un calcul à "rebours" à partir du profil idéal en acides aminés (SÈVE, 1994) et des besoins pour l'entretien précédemment décrits (tableau 1). Ceci permet de définir un rendement d'utilisation pour chacun des acides aminés. Le PD permis par l'apport de chaque acide aminé digestible (PD<sub>AA</sub>) est alors calculé selon le principe suivant :

$$PD_{AA} = ((\text{apport digestible standardisé} - \text{entretien}) \times k_{AA}) / AA_{\text{protéines corporelles}}$$

où  $k_{AA}$  est le rendement maximal de l'utilisation des acides aminés, et  $AA_{\text{protéines corporelles}}$  (LE BELLEGO et NOBLET, 2002), la composition en acides aminés des protéines corporelles (tableau 1). Ce calcul est effectué pour les 12 acides aminés essentiels, méthionine + cystine, phénylalanine + tyrosine, et pour la protéine. Le dépôt de protéines réalisé est le minimum entre les PD<sub>AA</sub> et le PD permis par l'apport énergétique.

## 2. CALIBRAGE ET UTILISATION

Comme indiqué ci dessus, le calibrage du modèle est une étape importante qui doit être effectuée dans une situation où l'animal peut exprimer son potentiel de performance dans son environnement d'élevage. Le calibrage sert à ajuster les paramètres du modèle afin que les prédictions correspondent aux observations. La nécessité du calibrage montre que, même si des lois génériques peuvent être proposées, la biologie animale reste un phénomène très complexe et il est impossible de prédire, dans l'absolu, les performances de l'animal.

Nous avons volontairement limité le nombre de paramètres à calibrer et essayé de les rendre "accessibles" pour l'utilisateur. Concernant l'animal, deux paramètres permettent de renseigner la consommation à volonté et quatre autres servent à décrire le potentiel de performances (PDMOYEN, PRECOCITE, ENTRETIEN, et PVPD MAX). En fonction du paramétrage, le modèle prédit directement les dépôts et masses de protéines et de lipides et estime le PV ainsi que quelques critères synthétiques comme l'épaisseur de lard dorsal et la TVM.

Les coefficients de l'équation de prédiction du PVV indiquent que la masse protéique a six fois plus d'influence sur le PVV

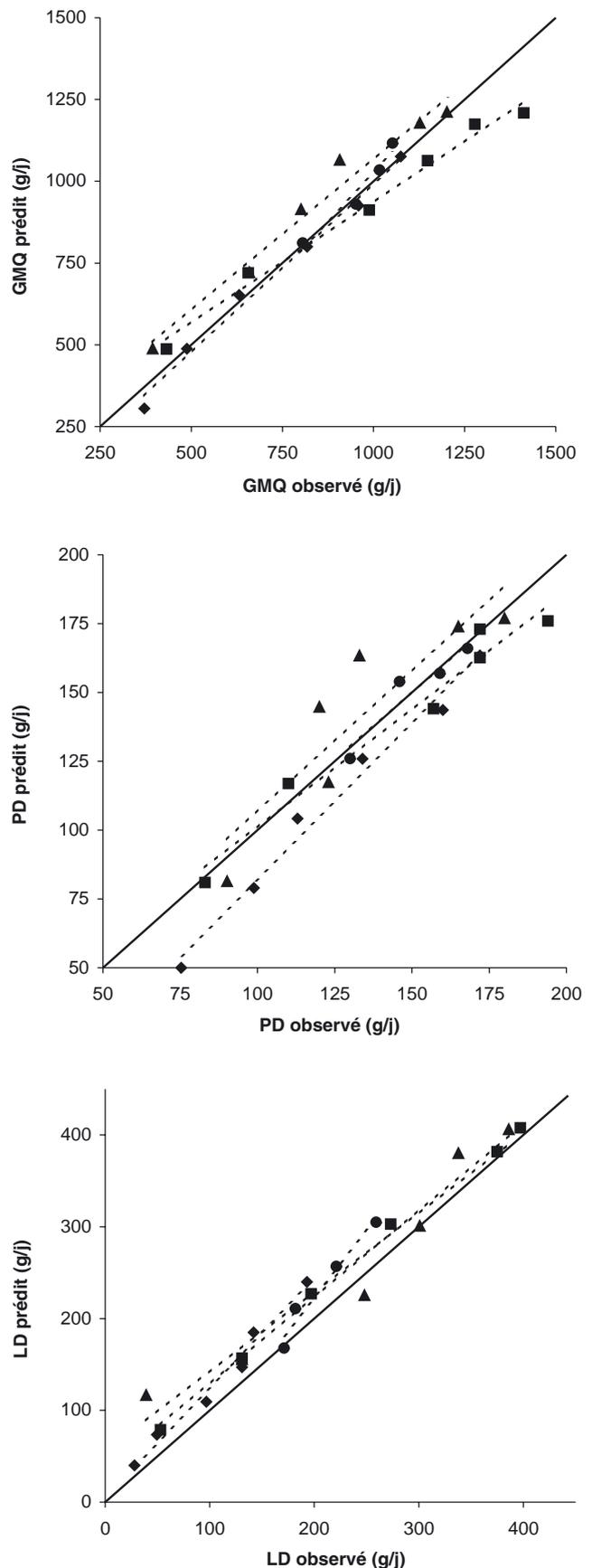
que la masse lipidique. Par conséquent, le changement des valeurs de PDMOYEN et PRECOCITE influence fortement le PV et le GMQ alors que ces critères sont très peu affectés par le paramètre ENTRETIEN qui agit surtout sur le dépôt de lipides. Pour justifier de changer la valeur de ENTRETIEN, on doit disposer de bonnes indications, comme par exemple un état d'engraissement observé très différent de la valeur prédite.

Puisque le modèle est basé sur les masses de protéines et de lipides, des informations sur la composition chimique de l'animal peuvent également être très utiles pour calibrer le modèle. Mais l'obtention de cette information est très difficile et coûteuse. Des critères comme l'épaisseur de lard dorsal ou la TVM sont également des indicateurs de l'état d'engraissement et peuvent, potentiellement, être utilisés pour calibrer le modèle. Cependant, les équations utilisées pour estimer ces paramètres ne sont pas récentes. Un travail est actuellement en cours pour mieux valoriser ces critères d'engraissement dans le calibrage du modèle.

En conclusion, l'utilisateur du modèle doit fournir cinq paramètres qui décrivent le potentiel de performance de l'animal dans une situation sans contraintes. Deux paramètres concernent la consommation à volonté en fonction du PV, et trois paramètres (PDMOYEN, PRECOCITE, et ENTRETIEN) décrivent la répartition de l'énergie entre PD et LD. Il est évident que les formes des courbes de consommation et de PD ont des conséquences sur les besoins nutritionnels ; un animal à croissance précoce mais à faible capacité de consommation initiale aura un besoin important en acides aminés (en kg d'aliment) en début de croissance.

### 3. VALIDATION

Il n'est pas possible de présenter ici une validation complète du modèle. Aussi nous avons choisi d'évaluer sa capacité à prédire la réponse à une restriction alimentaire. Dans ce but, nous avons sélectionné quatre jeux de données issus de trois publications (BIKKER et al, 1995 ; BIKKER et al, 1996 ; LE BELLEGO et al, 2002). Le modèle est paramétré en utilisant les performances (GMQ, PD, et LD) et les consommations observées pour des animaux nourris à volonté. Seuls les paramètres liés à la consommation, PDMOYEN et PRECOCITE ont été modifiés (les deux autres paramètres ont leurs valeurs par défaut ; ENTRETIEN = 1 et PVPD MAX = 70 kg). Ensuite, les restrictions alimentaires appliquées dans les expériences ont été utilisées pour comparer les prédictions du modèle par rapport aux observations. Le critère de moindre carré de l'erreur de prédiction (mean-square prediction error (MSPE) =  $1/n \sum (\text{prédiction} - \text{observation})^2$  ; BIBBY et TOUTENBURG, 1977) est utilisé pour quantifier la capacité prédictive. Le MSPE peut être décomposé en biais lié à la déviation des moyennes, biais dû à la régression, et biais dû aux perturbations (variation non expliquée par régression linéaire). La figure 3 montre les observations et les prédictions pour la croissance, PD et LD. Pour chaque jeu de données, la courbe de régression est aussi indiquée. Comme montré dans la figure 3, le modèle est capable de prédire les conséquences d'une restriction alimentaire imposée à l'animal et cela sur une plage de variation assez large.



**Figure 3** - Capacité du modèle à prédire les conséquences d'une restriction alimentaire. Le modèle est calibré pour la situation où l'animal est nourri à volonté (BIKKER et al, 1995  $\blacklozenge$  ; BIKKER et al, 1996 (contrôle)  $\blacktriangle$  ; BIKKER et al, 1996 (après restriction alimentaire)  $\blacksquare$  ; LE BELLEGO et al, 2002 (23°C)  $\bullet$  ; bissectrice — ; régression intra-étude ---).

La racine de MSPE est 78,7, 13,4 et 31,6 g/j pour le GMQ, PD et LD. Pour le GMQ et PD, une grande partie de MSPE était dû aux perturbations (95 et 79 %). Pour LD, 41 % de la MSPE est dû aux perturbations et 59 % au biais global. Comme le montre la figure 3, le modèle surestime quasi systématiquement le LD par, en moyenne, 24 g/j. Le fait qu'en parallèle PD soit bien prédit indique que le modèle sous-estime les pertes de chaleur (probablement liées à l'entretien), ce qui a pour conséquence d'accroître l'énergie disponible pour LD. Une augmentation du paramètre ENTRETIEN de 15 % (sans modifications des autres paramètres) réduit fortement ce biais (racine du MSPE pour des lipides est 19 g/j, avec 90 % de la variation due aux perturbations). Ce biais suggère que l'efficacité d'utilisation de l'énergie des réserves corporelles pour couvrir le besoin de l'entretien (FHP) serait sous-estimée. Ceci est probablement aussi la traduction du fait que les dépenses d'entretien et d'activité physique issues de mesures en chambre respiratoire, même si la durée d'activité est prise en compte, sont inférieures à celles réalisées dans des conditions d'élevage plus conventionnelles.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail était de présenter les grands principes d'un modèle de croissance du porc. Ce modèle est, en gran-

de partie, basé sur des systèmes nutritionnels classiques (EN, acides aminés standardisés). Son objectif, surtout dans sa version informatisée, est d'analyser l'utilisation des nutriments par l'animal et d'évaluer des scénarios nutritionnels différents. Il est prévu que ce modèle soit utilisé par des nutritionnistes du secteur de l'alimentation animale, ainsi que pour l'enseignement de la nutrition du porc.

L'approche actuelle se limite à une évaluation zootechnique des performances. Dans l'avenir, nous prévoyons d'approfondir certains aspects du modèle, afin de prendre en compte d'autres phénomènes, comme les interactions digestives ou les relations avec l'environnement climatique (FIALHO et al, 2004), ou pour prédire d'autres critères, comme la qualité des produits (ex., répartition des lipides corporelles et composition en acides gras (LIZARDO et al, 2002 ; KLOAREG et al, 2004). Il sera également nécessaire de transposer des connaissances acquises à l'échelle de l'individu à une échelle plus large comme le troupeau (prise en compte de la variabilité) ou l'exploitation.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la société Ajinomoto Eurolysine SAS pour leur soutien de ce projet.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BIBBY J., TOUTENBURG H., 1977. Prediction and improved estimation in linear models. John Wiley & Sons, Chichester, 188 p.
- BIKKER P., KARABINAS V., VERSTEGEN M.W.A., CAMPBELL R., 1995. *J. Anim. Sci.*, 73, 2355-2363.
- BIKKER P., VERSTEGEN M.W.A., CAMPBELL R.G., 1996. *J. Anim. Sci.*, 74, 817-826.
- FIALHO F.B., VAN MILGEN J., NOBLET J., QUINIOU N., 2004. *Anim. Sci.*, 79, 135-148.
- FULLER M.F., MCWILLIAM R., WANG T.C., GILES L.R., 1989. *Br. J. Nutr.*, 62, 255-267.
- KLOAREG M., LE BELLEGO L., MOUROT J., NOBLET J., VAN MILGEN J., 2004. *Journées Rech. Porcine*, 36, 189-194.
- LE BELLEGO L., NOBLET J., 2002. *Livest. Prod. Sci.*, 76, 45-58.
- LE BELLEGO L., VAN MILGEN J., NOBLET J., 2002. *Anim. Sci.*, 75, 85-96.
- LE GOFF G., NOBLET J., 2001. *J. Anim. Sci.*, 79, 2418-2427.
- LIZARDO R., VAN MILGEN J., MOUROT J., NOBLET J., BONNEAU M., 2002. *Livest. Prod. Sci.*, 75, 167-182.
- MOUGHAN P.J., 1998. In "A quantitative biology of the pig". 299-331. CABI Publishing, Oxon, UK, 398 p.
- NOBLET J., BONTEMS V., TRAN G., 2003. *INRA Prod. Anim.*, 16, 197-210.
- NOBLET J., FORTUNE H., SHI X.S., DUBOIS S., 1994. *J. Anim. Sci.*, 72, 344-354.
- QUINIOU N., NOBLET J., 1995. *J. Anim. Sci.*, 73, 1567-1575.
- SAUVANT D., 1992. *Reprod. Nutr. Dev.*, 32, 217-230.
- SAUVANT D., PEREZ J.-M., TRAN G., 2002. 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, 301 p.
- SÈVE B., 1994. *INRA Prod. Anim.*, 7, 275-291.
- VAN MILGEN J., NOBLET J., DUBOIS S., 2001. *J. Nutr.*, 131, 1309-1318.
- VAN MILGEN J., QUINIOU N., NOBLET J., 2000. *Anim. Sci.*, 71, 119-130.
- WHITTEMORE C.T., FAWCETT R.H., 1974. *Anim. Prod.*, 19, 221-231.