

# La modélisation de la réponse des porcs aux pratiques alimentaires et d'élevage

Daniel SAUVANT

UMR - INA. PG - INRA Physiologie, Nutrition et Alimentation  
Institut National Agronomique Paris-Grignon  
16, rue Claude Bernard - 75231 Paris cedex 05

## La modélisation de la réponse des porcs aux pratiques alimentaires et d'élevage

Au cours de la dernière décennie il y a eu confirmation de l'émergence du changement de paradigme de la nutrition animale qui a évolué de l'objectif de "**couvrir les besoins** pour exprimer le potentiel" à celui de "comprendre et prédire les **réponses multiples** aux régimes et pratiques alimentaires". Cette évolution a été rendue nécessaire par l'accroissement des objectifs et contraintes à intégrer simultanément: efficacité & compétitivité, qualité des produits, respect de l'environnement, santé et bien être des animaux, demandes des consommateurs... Une conséquence importante de ces changements concerne la nécessité de chercher à modéliser ces réponses animales pour mieux les comprendre et les prévoir. Deux principaux types de modèles sont appliqués, en nutrition et alimentation des porcins en particulier. **Les modèles mécanistes** cherchent principalement à expliquer, mais aussi à prédire, les réponses en intégrant des données et des relations sous-jacentes produites par la recherche. **Les modèles empiriques** ajustent statistiquement des données expérimentales, ils connaissent un net regain d'intérêt à travers les **méta-analyses des données** publiées de la littérature. Ces méta-analyses permettent en effet de synthétiser de vastes ensembles et bases de données pour en tirer des lois de réponses à caractère général. Actuellement ces deux types de modélisation sont de plus en plus souvent associés.

## Modelling pig responses to diets and feeding practices

During the last decade the emergence of a new paradigm in animal nutrition has been confirmed. An evolution from "**meeting requirements** to express potential" towards "understanding and predicting the **multiple responses** to diets and feeding practices" has been observed. The evolution was necessary because of the increasing number of objectives and constraints which need to be simultaneously integrated: efficiency and competitiveness, product quality, respect of the environment, animal health and welfare, consumers' demands... A major outcome of these changes was the necessity to model animal responses in order to understand and predict them. Two major types of models are currently used, particularly in pig nutrition and feeding. **Mechanistic models** are employed to explain, and also to predict, responses by integrating underlying data and relationships produced by research. **Empirical models** statistically fit experimental data. There has been renewed interest in this type of model due to its use in **meta-analyses of data** published in the literature. Indeed, meta-analysis allows the identification, using large data bases, of general response laws. Today these two types of models are frequently used together.

## INTRODUCTION : LE CHANGEMENT DE PARADIGME

Depuis une vingtaine d'années, les filières des productions animales et des produits subissent une évolution sans précédente des préoccupations et des objectifs. En effet, sans abandonner les premiers objectifs de **productivité** (efficacité alimentaire et biologique...), élément essentiel de la compétitivité des filières, une importance croissante a été accordée à plusieurs autres objectifs ou contraintes (figure 1). Parmi ceux-ci, il y a la **composition** et la **qualité** des produits commercialisés sachant que ce concept évolue de plus en plus vers des aspects liés à la **sécurité sanitaire** des aliments. D'autre part, en raison des niveaux excessifs de chargements animaux atteints dans certaines régions de l'Europe, les rejets animaux de matière organique, d'azote, de phosphore... sont devenus des flux considérés comme polluants. Ultérieurement il a été nécessaire d'intégrer des aspects relatifs au comportement et au **bien-être** des animaux, sachant que les problèmes de **santé** animale ont toujours été une préoccupation majeure de la filière porcine. A ce jour, la majeure partie de ces aspects se retrouve dans le concept de **développement durable**.

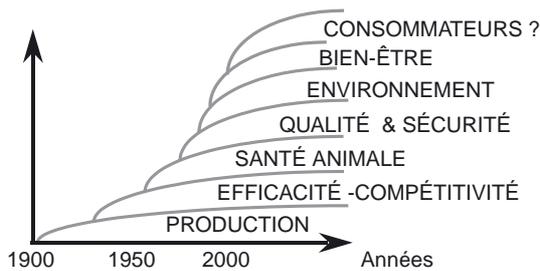


Figure 1 - Les défis des filières animales

Ces préoccupations s'appliquent à toutes les composantes scientifiques et techniques de l'élevage, même si, pour différentes raisons, les principaux exemples seront considérés dans le contexte de la nutrition et de l'alimentation des porcins. Dans ce secteur, l'évolution des préoccupations constitue une remise en cause d'un certain nombre de concepts bien établis. Ainsi, dans le domaine de l'alimentation, il n'est pas possible de répondre à toutes ces nouvelles questions en appliquant la démarche classique qui partait du **potentiel de production des animaux**, celui-ci était traduit en termes de besoins nutritionnels que l'on cherchait à satisfaire par la formulation du régime alimentaire. Cette formulation s'appuyait sur les **systèmes d'unités d'alimentation** (énergie, acides aminés...). Ces systèmes d'unités alimentaires ont constitué un pilier du progrès rationnel en alimentation animale. Ils se sont affinés et permettent de caractériser de plus en plus précisément les valeurs nutritives potentielles des aliments (NOBLET, 2002 - Tables INRA-AFZ, 2002). Cependant, il convient « d'inventer autre chose » pour s'adapter au nouveau contexte. Ainsi, on assiste depuis quelques années à l'émergence d'une démarche alternative qui consiste à mieux comprendre et prédire **les réponses** des animaux aux variations des régimes et des pratiques alimentaires, des pratiques d'élevage plus globalement. En

effet, seule la connaissance de ces réponses peut permettre de « situer » précisément ces différentes pratiques par rapport aux dimensions évoquées plus haut (efficacité, qualité des produits, environnement, santé et bien-être...).

Cette nouvelle façon de considérer les choses a souligné quelques limites des approches classiques appuyées sur les systèmes d'unités d'alimentation (SAUVANT et al, 1995). Ces limites sont particulièrement liées au fait que les relations causes (ex. niveau d'ingestion) - effets (réponses zootechniques) sont supposées être **linéaires**. Elles sont aussi liées au fait que les principales **interactions digestives** entre les constituants d'une ration ou les **interactions métaboliques** entre nutriments absorbés ne sont en général pas prises en compte. Enfin, certaines unités actuelles d'alimentation, en particulier pour l'énergie, **agrégent** des nutriments qui possèdent des propriétés physiologiques et nutritionnelles, donc des potentiels de réponse, très différentes. Enfin, les unités d'alimentation sont conçues et appliquées sur la base de **pas de temps de 24 h**, or des événements déterminants des réponses peuvent intervenir sur des pas de temps bien plus courts, à l'inverse, certains types de réponses nécessitent de considérer des pas de temps bien plus longs (alimentation par phases...).

## 1. LES TYPES ET DÉMARCHES DE MODÉLISATION DES LOIS DE RÉPONSE

L'ensemble des zootechniciens s'accorde pour estimer que le changement de paradigme évoqué ci-dessus passe par le développement des approches de modélisation systémique des organismes animaux et des élevages. En conséquence, la modélisation des lois de réponse aux régimes et pratiques alimentaires constitue une étape méthodologique essentielle de l'évolution des concepts et des outils en sciences animales. Nous avons eu l'occasion d'écrire des synthèses sur cette approche (SAUVANT, 1992, 1999). Selon l'objectif et les données disponibles, différents types de modèles sont utilisables en nutrition animale. En général, on est amené à distinguer 3 clefs typologiques pour classer les modèles (FRANCE, THORNLEY, 1984) : empirique vs mécaniste, statique vs dynamique et déterministe vs aléatoire. Les principales applications possibles sont décrites dans les lignes qui suivent.

### 1.1. Les modèles empiriques

Les modèles empiriques considèrent le système objet d'étude (par exemple l'organisme) comme une « boîte noire » et servent à prédire les « flux de sortie » à partir de la connaissance des « flux d'entrée » alimentaires. Des modèles empiriques peuvent également être utilisés pour effectuer une démarche réciproque, par exemple pour prédire le niveau d'ingestion à partir du poids vif et du niveau de performance (WITTEMORE et al, 1995) ou bien pour prédire un besoin en énergie en fonction du poids vif et des niveaux d'accumulation des protéines et des lipides corporels. Ces modèles empiriques peuvent être de type **statique**, par exemple s'ils considèrent les valeurs moyennes mesurées sur une période de temps. De nombreux exemples de ce type ont été publiés, par exemple pour prédire la composition corporelle du porc en croissance (QUINIOU et NOBLET, 1995). Ils peuvent

aussi être de type **dynamique** s'ils intègrent l'influence du temps. Ainsi de nombreux modèles empiriques de croissance ont été appliqués aux porcs (ROBINSON, 1975 ; POMAR et al, 1991 ; COLIN et QUERNE, 1991 ; AUBRY et al, 2004). Les modèles empiriques peuvent également être de type **stochastique** ou **déterministe** selon qu'ils tiennent compte, ou non, de l'incertitude qui entoure les valeurs des paramètres pris en compte. Par exemple, l'ajustement de données expérimentales par une régression constitue un modèle stochastique dans la mesure où tous les paramètres calculés sont associés à une incertitude. Par contre, la formulation à moindre coût d'un aliment composé par programmation linéaire représente un modèle déterministe dans la mesure où les paramètres techniques pris en compte sont considérés comme fixes.

Les modèles empiriques ont constitué un outil essentiel du progrès, en effet, ils ont été appliqués dans tous les domaines et ont permis d'améliorer notre compréhension de nombreux mécanismes et de disposer de modèles de prédiction de plus en plus précis. Ceux-ci ont notamment concerné des besoins nutritionnels et des valeurs des aliments (NOBLET, 2002). De plus, plusieurs modèles empiriques peuvent être combinés au sein d'un même « modèle de flux ». De telles constructions sont de plus en plus nombreuses, avec, dans certains cas, des modèles très complets. Par exemple, ces modèles ont été utilisés pour prédire les réponses animales à des caractéristiques du régime : tissus déposés (WHITTEMORE C.T. ; FAWCETT R.H., 1974 ; MOUGHAN et al, 1987), génotypes (BLACK et al, 1986), flux de rejets d'azote (DOURMAD et al, 1992 et 2002) et de phosphore (CASTAING et al, 2003), compostion en acides gras des tissus (VAN MILGEN) etc...

## 1.2. Modèles empiriques et méta-analyses des données

Les modèles empiriques ont vu leur « cote » décroître transitoirement avec l'émergence des modèles mécanistes (cf plus loin). Cependant au cours des dernières années, ils ont présenté un net regain d'intérêt à travers les approches par **méta-analyse des bases de données**. En effet, il y a de plus en plus de publications par sujet digne d'intérêt et de plus en plus de données chiffrées par publication. Par contre, les facteurs expérimentaux à tester ont, en général, des effets de moins en moins marqués. Deux autres aspects sont aussi à considérer. Il s'agit d'abord du fait que l'approfondissement des recherches aboutit à produire des résultats situés à des niveaux d'organisation de plus en plus sous-jacents par rapport aux objets de recherche habituels, ce qui renforce la nécessité de mettre en œuvre des processus de **biologie intégrative** puisque la connaissance acquise doit être « portée » au niveau de l'animal entier ou du système de production. Il s'agit ensuite du fait que les utilisateurs de la recherche réclament aujourd'hui une information présentant un caractère quantitatif plus marqué et une meilleure précision, et qui soit ainsi facilement intégrable dans des logiciels d'aide à la recommandation et à la décision, en élevage ou en entreprise. Enfin, dans certains secteurs, la concentration des moyens autour de programmes « prioritaires » peut amener à supprimer certaines thématiques des programmes

de recherches expérimentales et oblige alors à maintenir un minimum de **veille bibliographique** dans des domaines ainsi délaissés.

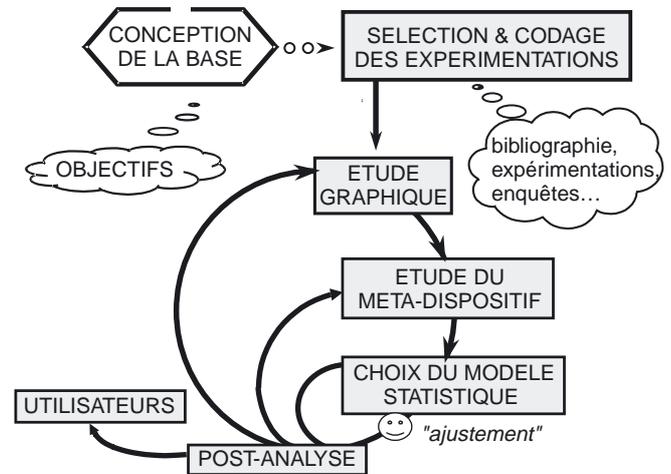


Figure 2 - Les étapes d'une méta-analyse

En conséquence, ces méthodes de méta-analyses statistiques des bases de données publiées deviennent prépondérantes et il importe de les mettre en œuvre d'une façon adéquate. Les méta-analyses s'effectuent en plusieurs étapes qui constituent une démarche heuristique (figure 2). La première phase concerne la définition **des objectifs du travail** et du **cahier des charges** qui en découle, celui-ci est déterminant pour le choix des publications candidates. Celles-ci doivent être scrupuleusement évaluées avant d'être intégrées dans la base. Lors de cette intégration il convient d'effectuer un soigneux travail de **codage** (expériences, traitements...) qui seront autant de repères essentiels dans la suite de l'analyse. Les **bases de données** ainsi construites soulèvent des difficultés d'interprétation, elles contiennent des données manquantes, ce fait constitue un handicap important puisqu'il n'est pas possible d'appliquer des méthodes statistiques multivariées (analyse en composantes principales...). En outre, de telles bases de données ne représentent pas un dispositif expérimental classique par rapport à l'interprétation statistique. Il est recommandé d'effectuer une première étape d'**interprétation graphique** de manière à pouvoir avoir une vue à la fois globale et précise des données. Cette phase est suivie d'une étude du **méta-dispositif** constitué par la base à interpréter. Ces différentes étapes conditionnent la définition du **modèle statistique** appliqué pour traiter les données. Celui-ci doit permettre de bien différencier les variations inter et intra-expériences, cet aspect est important à souligner car des modèles faux ont pu être publiés et utilisés par le passé par ignorance de ce principe. En effet, les variations inter-expériences sont souvent très importantes, par contre elles ne contiennent pas les lois générales recherchées qui correspondent aux variations intra expériences. Les méta-analyses peuvent intégrer des facteurs qualitatifs ou quantitatifs, d'autre part le modèle statistique posé tient compte d'effets fixes ou aléatoires. Enfin, il peut tenir compte de systèmes de pondérations des données. Après ajustement du modèle, il convient de mettre en œuvre une **étude post-analytique** qui consiste en particulier à étudier les varia-

tions résiduelles et les rôles des différents traitements et expériences dans les résultats obtenus. A ce stade, il est souvent nécessaire, de revenir à une des étapes précédentes. Ainsi les méta-analyses constituent une démarche heuristique.

Des méta-analyses ont déjà été publiées dans le domaine porcin, par exemple pour modéliser l'ingestion (LOVATTO et SAUVANT, 2002a) et les besoins en P digestible (CASTAING et al, 2003).

### 1.3. Les modèles mécanistes

Les modèles mécanistes ont pour but de prévoir les réponses d'un système, par exemple l'organisme animal, en intégrant les relations biologiques sous-jacentes les plus déterminantes. Ce type de modélisation est bien adapté à la modélisation systémique des « lois de réponses » évoquée plus haut car il s'appuie sur des structures compartimentales hiérarchisées ;

Le sous-système opérant correspond à un ensemble extraordinairement enchevêtré de compartiments reliés par des voies de transferts multiples. En première approximation, on subdivise l'organisme en deux sous-systèmes : le système digestif qui traite les aliments et le système métabolique qui utilise les produits terminaux de la digestion. Les compartiments et voies de transferts du système digestif sont anatomiquement évidentes. Au niveau du système métabolique, on distingue les compartiments tissulaires (muscles, foie...) et les compartiments métaboliques (glucose, calcium...) associés au sein d'une organisation hiérarchique. Ces compartiments tissulaires et métaboliques sont reliés entre eux par des voies anatomiques (réseau sanguin...) et des flux métaboliques (glycolyse...).

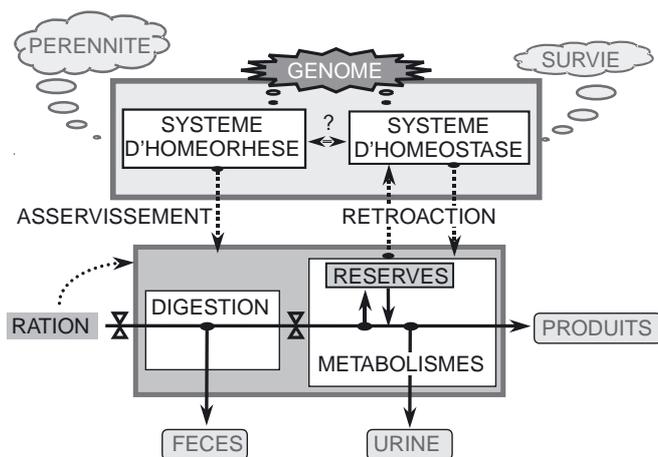


Figure 3 - L'approche systémique de la nutrition

Le sous-système régulateur a pour objet de **modifier les valeurs des flux** entre compartiments sur la base d'informations d'origines endogènes (taille d'un compartiment métabolique, importance d'un flux métabolique...) ou exogènes (présentation et palatabilité de la ration...). Les sys-

tèmes hormonaux de la nutrition représentent la majeure partie du système régulateur qui détermine des lois de réponse aux régimes. On distingue deux sous-systèmes régulateurs : les systèmes d'homéostasie et d'homéorhèse (figure 3) qui soutiennent respectivement les finalités de survie de l'individu et de pérennité de l'espèce. Les régulations d'homéostasie (ou homéostasie) assurent le maintien des grands équilibres biologiques dans des « fourchettes vitales », il intervient en particulier en phase pré- et post prandiale pour assurer la meilleure partition des nutriments et la régularité de leurs apports sur les lieux de synthèse. Ils interviennent également pour maintenir la température corporelle constante, ils sont par ailleurs en partie sollicités dans un certain nombre de situations de stress. Les régulations d'homéorhèse (ou téléophorèse) contrôlent les métabolismes en vue d'assurer le bon déroulement d'une fonction physiologique majeure : la reproduction (gestation, lactation) mais aussi la croissance. Ce contrôle des flux sous homéorhèse concerne, comme pour l'homéostasie, l'ingestion, la digestion et l'utilisation métabolique des nutriments.

Jusqu'à présent, les recherches sur la nutrition des animaux se sont principalement tournées, pour des raisons de possibilités expérimentales, vers l'amélioration des connaissances sur le sous-système opérant : on connaît ainsi de façon assez précise la structure de l'organisme et des tissus. D'autre part, des mesures des turnovers des compartiments ainsi que des flux digestifs, nutritifs et métaboliques ont été pratiquées et permettent de disposer d'une information quantitative assez fournie de la nutrition de l'organisme. Par contre, le système régulateur est moins connu et ne peut être l'objet d'une modélisation construite sur la base des résultats des mesures expérimentales. En conséquences, les sous-modèles construits à ce niveau sont souvent largement **théoriques** et font appel au principe de **pertinence**. Ce problème de la représentation des systèmes régulateurs se pose pour toutes les productions. Par exemple, dans la plupart des modèles de croissance des porcs, ou d'autres animaux, la force motrice du modèle a été constituée par une équation différentielle d'un modèle algébrique de croissance (logistique, Gompertz...). Dans des modèles plus récents, la représentation des renouvellements tissulaires a permis de construire des « moteurs de croissance » présentant une signification biologique plus exacte (DANFAER, 1991 ; LOVATTO et SAUVANT, 2002b). Dans le cas de la fonction de lactation, le principe de construction d'un sous modèle théorique a été aussi appliqué. Ainsi, dans le modèle de PETTIGREW et al (1992), évoqué plus loin, le sous-système régulateur est représenté par une hormone théorique de contrôle d'homéorhétique de la lactation qui varie selon l'équation :  $HR = a + bt + ct^2$  où  $t$  correspond au temps (jours)  $a$ ,  $b$  et  $c$  à des paramètres obtenus par l'ajustement des résultats de ELSLEY (1971). Les paramètres  $a$ ,  $b$ ,  $c$  permettent de prendre en compte le potentiel de production, l'âge ou la taille de la portée. L'intensité des voies cataboliques est directement dépendante de HR. Le facteur HR contrôle les voies métaboliques et le niveau des sécrétions et prélèvements mammaires, ce qui permet d'assurer une bonne coordination entre les niveaux de production laitière et des mobilisations corporelles du début de la lactation.

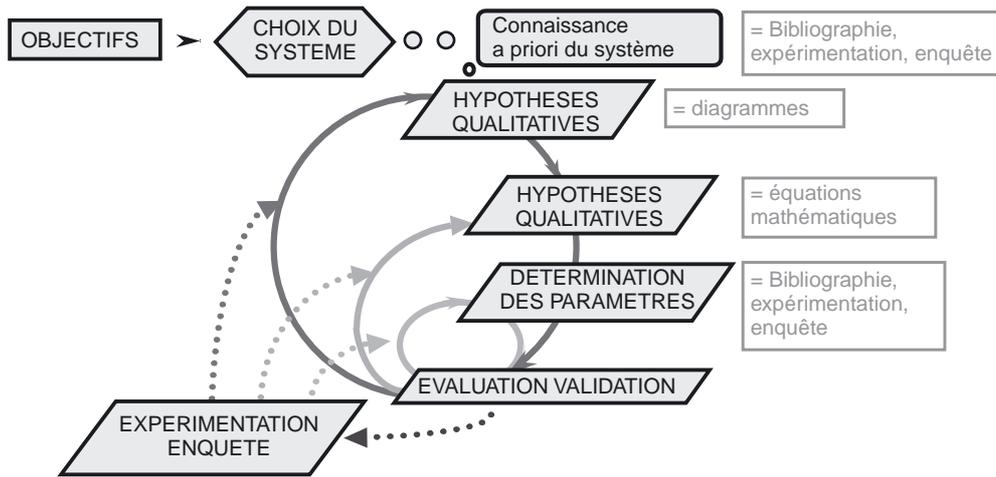


Figure 4 - Les étapes de l'élaboration d'un modèle

**Le développement d'un modèle mécaniste** s'effectue en plusieurs étapes qui sont résumées dans la figure 4. La première étape consiste à rassembler les informations disponibles sur le système objet d'étude. A partir de ces informations, il convient de construire un premier diagramme simple, voir simpliste, du système. Celui-ci laisse apparaître les structures compartimentales et fonctionnalités minimales. Ce diagramme minimal sert de support à la première « mathématisation ». Le principe de base de la modélisation du système opérant est de considérer que la variation de la quantité de substance  $Q_i$  d'un compartiment  $i$  pendant un court intervalle de temps  $dt$  est égale à la différence entre la somme des flux entrants ( $F_e$ ) et sortants ( $F_s$ ) pendant  $dt$

$$dQ_i/dt = \sum F_{e_i} - \sum F_{s_k}$$

Chaque flux reliant des compartiments doit être traduit en un modèle mathématique, c'est souvent à ce niveau que sont pris en compte les fonctions de contrôle du système. Les valeurs des paramètres inclus dans les expressions des flux sont à déterminer dans l'étape ultérieure du travail. Celle-ci est suivie de la phase de simulation. La phase d'évaluation suit la simulation, elle comprend généralement deux étapes, les **validations interne** et externe. La validation interne consiste principalement à étudier la sensibilité du comportement du modèle à des variations des valeurs des paramètres. Elle consiste aussi à rechercher les comportements particuliers (cf les notions d'attracteur...), voire imprévisibles (cf les notions de chaos...) du modèle. La **validation externe** a pour but d'évaluer si le modèle réalisé aboutit à des résultats proches de la réalité qu'on cherche à simuler. Celle-ci s'appuie généralement sur l'étude de 3 paramètres qui permettent de juger de la nature et de l'ampleur des biais (figure 5). Bien entendu, cette démarche doit s'appliquer à un jeu de données entièrement différentes de celles qui ont servi à construire le modèle.

Plusieurs modèles mécanistes à compartiments ont été publiés en nutrition porcine, nous en citerons 5 exemples représentatifs des démarches envisageable :

a. BASTIANELLI et al ; (1996) ont développé un modèle mécaniste de la digestion du porc. Quatre compartiments

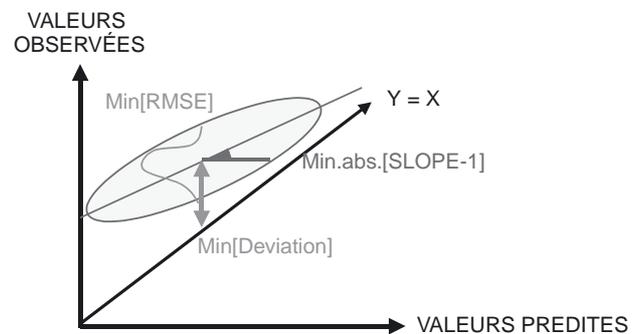


Figure 5 - Validation externe d'un modèle : étude de 3 paramètres de base

digestifs ont été distingués : l'estomac, le duodénum, le jéjunum et l'ensemble gros intestin + cæcum. Au niveaux sous jacents 28 compartiments biochimiques (protéines, amidon, parois végétales...) ont été pris en compte dans l'ensemble des 4 compartiments digestifs. Ce modèle est capable de simuler la dynamique des événements digestifs et les flux de nutriments absorbés les plus consécutifs à l'ingestion d'un aliment donné. Il devrait permettre de faire progresser les méthodes d'évaluation des aliments et des régimes. D'autre part, il peut constituer la première étape d'un modèle plus détaillé qui intégrerait des aspects liés à la composition en acides aminés des protéines et en acides gras des lipides. Enfin, il peut être associé à un modèle d'utilisation métabolique des nutriments.

b. De LANGE (1993) a proposé un modèle mécaniste simple du métabolisme du porc en croissance. Malgré sa grande simplicité (2 compartiments corporels : lipides et protéines), ce modèle présente des aspects intéressants, il intègre l'influence d'un acide aminé limitant sur la croissance et la répartition des nutriments et des gains tissulaires. D'autre part, il s'appuie sur l'existence d'une limite minimale du rapport des gains lipidique/protéique.

c. Au niveau métabolique DANFAER (1991) a publié un modèle simple permettant de définir la croissance du porc et le rôle des nutriments de façon mécaniste et biologiquement pertinente (turn over des tissus). Le principe de base

de ce modèle a été repris par LOVATTO et SAUVANT (2002) pour développer un modèle mécaniste plus complet du porc en croissance. Celui-ci comprenait 4 compartiments tissulaires et 32 compartiments biochimiques. Les principes d'homéorhèse et d'homéostasie qu'il inclut permettent de simuler de façon satisfaisante les réponses à des acides aminés facteurs limitants.

- d. PETTIGREW et al (1992) ont mis au point un modèle mécaniste de la nutrition de la truie en lactation. Le sous-système opérant de ce modèle comprend 3 compartiments tissulaires (protéique et adipeux) et 8 métaboliques (acides aminés, lysine, glucose, acides gras, acétate et acétyl-CoA et propionate). Trois flux de protéines, matières grasses et glucose convergent vers la mamelle. Ce modèle comprend en outre des sources et des puits d'ATP, ce qui est assez rare. Le sous-système régulateur théorique de ce modèle a été évoqué plus haut. Il contrôle la cohérence entre les flux métaboliques, l'ingestion et la production.
- e. BOURSIER et al (2004) ont effectué un travail de double modélisation intéressant en vue d'optimiser le traitement du lisier des porcs. Un premier modèle représentait un pilote et le second un modèle mathématique à compartiment.

Enfin, la modélisation mécaniste peut s'envisager à des niveaux autres que l'organisme, par exemple un atelier ou une exploitation peuvent être vus sous l'angle d'un système piloté par l'éleveur sachant que celui-ci applique des décisions d'ordre stratégique (cf d'homéorhèse) ou tactique (cf l'homéostasie). Il y a ainsi une analogie entre organisme et exploitation (figure 6) qui permet de leur appliquer des concepts et outils analogues.

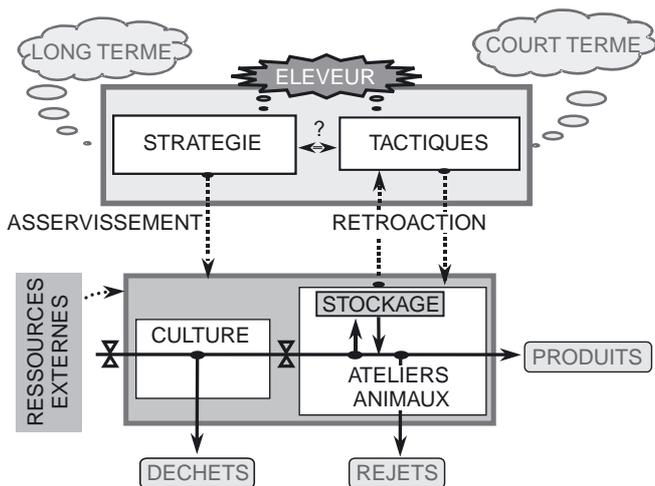


Figure 6 - L'approche systémique de l'élevage

## 2. LES RELATIONS ENTRE LES MODÉLISATIONS MÉCANISTES ET EMPIRIQUES

Les deux types de modélisation évoqués ci-dessus ont parfois été mis en concurrence, en particulier à la période où la

modélisation empirique se développait. Il était alors souvent estimé que la modélisation mécaniste allait continuer à se développer rapidement et supplanter progressivement l'empirique. En fait le développement des méta-analyses des bases de données est venu atténuer ces prévisions pour différentes raisons :

- les méta-analyses permettent de tirer un réel profit de la richesse des résultats publiés au cours des années passées dans les principaux domaines d'intérêt. En outre, elles produisent les informations synthétisées sur les réponses animales qui sont sous une forme facilement utilisable pour le conseil ou l'aide à la décision.
- Les modèles mécanistes ont une vocation de modèle de recherche qui se nourrissent des résultats les plus récents obtenus à des niveaux d'organisation sous-jacents, ils se développent ainsi plus de « l'intérieur » qu'au niveau des relations avec des éléments exogènes. Ils constituent ainsi des chantiers de taille croissante et des travaux de long terme qui donnent parfois l'impression de n'être jamais achevés.
- Un des espoirs mis dans les modèles mécanistes était de fournir des résultats présentant une portée plus générale que les modèles empiriques. Ce principe reste vrai en théorie, cependant, pour l'instant, les méta-analyses rendent de plus grands services grâce à la diversité des aspects qu'elles sont à même d'intégrer simultanément.

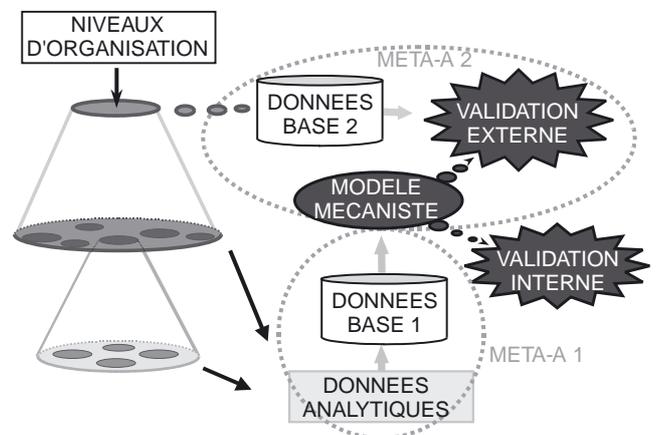


Figure 7 - Modèles mécanistes et méta-analyses

Un autre aspect à évoquer dans cette partie concerne la complémentarité qui se développe entre les modélisations mécaniste et par méta-analyse (SAUVANT et MARTIN, 2004). La figure 7 résume les deux principaux points d'ancrage entre ces deux méthodes. Dans le contexte de l'élaboration d'un modèle mécaniste, les approches par méta-analyses peuvent aider à « caler » certaines valeurs initiales ou certains paramètres intermédiaires du système modélisé. Lors de la construction des modèles mécanistes, c'est sans doute pour définir les relations associant les compartiments et les flux associés que les méta-analyses sont le plus utiles. Elles permettent en effet de définir des lois de transfert présentant des valeurs plus générales et/ou intégrant certains facteurs

de variation. Les méta-analyses peuvent également être mises en œuvre avec un grand intérêt pour conduire la validation externe d'un modèle mécaniste comme cela a été fait chez le porc en croissance par LOVATTO et SAUVANT, (2002), ou bien pour conduire une évaluation comparative critique de plusieurs modèles mécanistes (OFFNER et SAUVANT, 2004).

### 3. MODÉLISATION ET OPTIMISATION ÉCONOMIQUE

Classiquement, l'optimisation alimentaire est réalisée en formulant à moindre coût, par programmation linéaire, une unité de poids d'un mélange adapté à un type donné d'animal. La spécificité de l'animal est traduite par les valeurs du « second membre » de la formulation : concentration en éléments nutritifs et en énergie, etc. Cette démarche, dont le principe n'a pour ainsi dire pas évolué depuis plusieurs décennies, fait l'hypothèse que le niveau d'ingestion est connu avec précision et est proportionnel au niveau de production et que le profil des besoins est identique quel que soit ce niveau de production (et d'ingestion). L'émergence de la notion de lois de réponses multiples amène à réfléchir sur de nouvelles méthodes d'optimisation les intégrant. L'objectif est alors plutôt de chercher à maximiser une marge brute de transformation. Une question soulevée par cette approche est celle de l'estimation de la valeur économique des différents flux impliqués.

En réalité, ce type d'approche a été suggéré depuis longtemps en alimentation porcine. La première tentative d'intégration de la performance zootechnique au sein d'un processus d'optimisation par programmation linéaire a vraisemblablement été faite par DENT (1964). Cette approche était statique, d'autres études presque aussi anciennes ont cherché à intégrer le temps. Ainsi, CRABTREE (1977) avait proposé un modèle permettant d'optimiser la stratégie d'alimentation du porc en croissance en fonction du contexte économique. Des approches dynamiques d'optimisation en temps continu, ont également été proposées pour le porc en croissance. Ainsi, BURLACU et MIRICA (1992) ont utilisé pour base le modèle de WHITTEMORE (1983) pour appliquer le principe d'optimalité de PONTRYAGIN. Ce modèle présente l'avantage de pouvoir simuler différents

types de contrôle optimal selon les objectifs fixés. Dans le cas de la truie en lactation WHITTEMORE et MORGAN (1990) ont proposé un modèle d'optimisation économique basé sur l'emploi d'équations de description de l'évolution des principales caractéristiques zootechniques.

### CONCLUSIONS

Les productions porcines sont très concernées par la multiplication des défis aux filières animales. Leur intégration devrait permettre de maintenir au niveau des élevages et de la filière une forte capacité à s'adapter à l'évolution des contextes techniques, environnementaux, économiques, sociaux... Cette adaptation place la démarche «lois de réponses» au centre du décor. En effet, seule cette approche peut prendre en compte simultanément les différents objectifs d'efficacité, de qualité des produits, de contrôle des rejets... et permettre de définir un régime économiquement optimal réalisant forcément un certain degré de compromis entre ces différentes contraintes.

Les travaux de modélisation ont débuté il y a déjà plusieurs décennies dans des domaines appliqués à l'élevage, en particulier dans le domaine porcine. Cependant, ce n'est que depuis 10-15 ans que les travaux se densifient dans ce domaine en raison de l'accroissement de la puissance des ordinateurs. Les modèles empiriques ont rendu et rendront de grands services pour formaliser et prédire la valeur des aliments, les niveaux des besoins et certains flux d'éléments nutritifs. Ils demeureront à ce titre un outil de travail indispensable. La modélisation empirique « rebondit » très largement ces derniers temps dans le cadre du développement des méta-analyses des bases de données.

Les modèles mécanistes semblent pouvoir être capables d'assurer à terme un certain renouveau, particulièrement au niveau de la recherche, d'une part, en permettant de définir de nouvelles priorités et ; d'autre part, en faisant évoluer nos concepts sur l'organisation et les régulations de l'organisme. Cependant, la modélisation mécaniste n'est pas une voie facile. En effet, des résultats probants et directement utilisables ne peuvent être disponibles qu'après un délai de temps souvent plus important que ce qui était initialement envisagé.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUBRY A., QUINIOU N., LE COZLER Y., QUERNE M., 2004. Journées Rech. Porcine, 36, 83-90.
- de LANGE, C.F.M., 1993. In: International Course «Modeling growth in the pig», Wageningen.
- BASTIANELLI D., SAUVANT D., 1994, Symposium Modelling Nutrient Utilization in Farm Animal (Foulum, Danemark).
- BASTIANELLI D., SAUVANT D., RERAT A., 1996. J. Anim. Sci., 74, 1873-1887.
- BLACK J.L, CAMPBELL R.G., WILLIAMS I.H., JAMES K.T., DAVIES G.T., 1986. Research and Development in agriculture, 3, 121-145.
- BOURSIER H., BELINE F., GUIZIOU F. 2004. Journées Rech. Porcine, 36, 83-90.
- CASTAING, J., PABOEUF F., SKIBA F., CHAUVEL J., CAZAUX J.G., VAN MILGEN J., COLIN S., QUERNE M. 1991. Journées Rech. Porcine en France, 23, 255-266.
- CRABTREE J.R., 1977. J. Agric. Economies, 28, 1, 39-52.
- DANFAER A., 1991. Livest. Prod. Sci., 27, 1-18.
- DOURMAD J.Y., GUILLOU D., NOBLET J., 1992. Livest. Prod. Sci., 31, 95-107.
- DOURMAD, J.Y., POMAR C., MASSE D., 2002. Journées Rech. Porcine, 34, 183-194.
- DENT J.B., 1964. J. Agric. Econ., 16, 68-87.
- DOURMAD J.Y., 1987. Journées Rech. Porcine en France, 19, 203-214.
- ELSLEY F.W.H., 1971. In Lactation, Ed. FALCONER, Butterworth.
- FRANCE J., THORNLEY J.M.H, 1984. Mathematical Models in Agriculture. Butterworth.
- LOVATTO P., SAUVANT D., 2002. Journées Rech. Porcine, 34, 129-134.
- LOVATTO P., SAUVANT D., 2002. J. Anim. Sci., 81, 683-696.
- MOUGHAN P.J., SMITH W.C., PEARSON G, 1987. New Zeal. J. Agric. Res., 30, 481-489.
- NOBLET J., DUPIRE C., FORTUNE H., 1990. Journées Rech. Porcine en France, 22, 229-236.
- NOBLET J., FORTUNE H., DUBOIS S., HENRY Y., 1989. Nouvelles bases d'estimation des teneurs en énergie digestible, métabolisable et nette des aliments pour le porc, INRA éd., Paris, 106p.
- NOBLET J., 2002, Tables INRA-AFZ, INRA ed.
- OFFNER A., SAUVANT D. 2004. Animal Feed Sci. And Tech. 112, 107-130.
- POMAR C., DEWEY L.H., MINVIELLE F., 1991. J. Anim. Sci., 69, 1468-1488.
- PETTIGREX J.E., GILLE M., France J., CLOSE W.H., 1992. J. Anim. Sci., 70, 3742-3761.
- QUINIOU N., NOBLET J., 1995, J. Anim. Sci., 73, 1567-1575.
- ROBINSON O.W., 1975, J. Anim. Sci., 42, 1024-1035.
- SAUVANT D., 1992, Rep. Nutr. Dev., 32, 217-230.
- SAUVANT D., BASTIANELLI D., VAN MILGEN J., 1995. Journées Rech. Porcine en France, 27, 237-244.
- SAUVANT D., 1999, Journées Rencontres Recherches sur les Ruminants, 6, 11-17.
- SAUVANT D., MARTIN O., 2004. Recueil du 6<sup>e</sup> "Workshop on Modelling Nutrient Utilisation in Farm Animals" (sous presse).
- WHITTEMORE C.T., 1983. Agric. Syst., 11, 159-186.
- WHITTEMORE C.T., FAWCETT R.H., 1974. Anim. Prod., 19, 221-231.
- WHITTEMORE C.T., MORAN C.A., 1990. Livest. Prod. Sci., 26, 1-37
- WHITTEMORE C.T., KERR J.C., CAMERON N.D., 1995. Agric. Syst., 47, 235-244.