

SYSTÈMES D'UNITÉ D'ALIMENTATION ET LOIS DE RÉPONSE DU PORC AUX RÉGIMES ALIMENTAIRES

D. SAUVANT (1), D. BASTIANELLI (1), J. VAN MILGEN (2)

Institut National de la Recherche Agronomique

(1) *Laboratoire de Nutrition et Alimentation - INA-PG, 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05*

(2) *Station de Recherches Porcines - 35590 Saint Gilles*

Les systèmes classiques des unités d'alimentation ont rendu et rendront encore de grands services en nutrition porcine. Ils permettent en effet de définir des régimes adaptés à un potentiel donné. Récemment, on a assisté à une diversification des préoccupations nécessitant de prendre en compte, outre l'efficacité alimentaire, la qualité du produit, les flux d'excrétion de rejets... Il est donc devenu indispensable d'être capable de prédire simultanément les différentes lois de réponse de l'animal aux variations de son régime alimentaire et d'autres facteurs d'environnement. La modélisation semble être une méthode bien adaptée pour atteindre cet objectif. Différents types de modèles, empiriques ou mécanistes, peuvent être utilisés. Ceux-ci présentent des avantages et inconvénients respectifs. La modélisation empirique est pratiquée depuis plusieurs décennies au travers des courbes de croissance, des digestibilités, etc. La modélisation mécaniste est d'application plus récente, elle présente l'intérêt d'intégrer des mécanismes biologiques sous-jacents, et son développement futur sera vraisemblablement important malgré les difficultés inhérentes à ce type d'approche.

Feed units systems and laws of response of the pig to the diets

The classical systems of feed units have been and will remain very useful in swine nutrition. They permit to determine diets suited to the potentiel of production. Recently, there was a diversification in the objectives of animal husbandry which lead to take into consideration not only the feed efficiency, but also the quality of the product and the fluxes of excreted wastes... It becomes thus necessary to be able to predict simultaneously the various laws of response of animals to the diet variations. Modelling seems to be a well suited method to reach this target. Various types of models, empirical or mechanistic, can be used. They all present advantages and drawbacks. Empirical modelling has been applied for several decades with growth curves and concepts of digestibility. Mechanistic modelling is more recent, and has the advantage of integrating the underlying biological mechanisms. Its future development is likely to be important despite some difficulties bound to this approach.

INTRODUCTION

Les systèmes d'unité d'alimentation ont joué, et continueront à jouer, un rôle essentiel dans les progrès de la nutrition des animaux. Ces systèmes s'appuient, rappelons-le, sur trois aspects essentiels :

- la **définition de l'unité de base** qui représente un **flux d'énergie ou de matière** mesuré à un niveau donné de l'utilisation des aliments par l'organisme. Cette unité permet d'exprimer à la fois les apports alimentaires et les besoins des animaux ; elle doit être additive pour permettre d'effectuer des substitutions entre les ingrédients.
- des méthodes précises de prévision de la **valeur des aliments** exprimée en unités sur la base de critères analytiques standards, aussi reproductibles, précis, simples et peu coûteux que possible.
- des méthodes précises de prévision de la **valeur des besoins** nutritionnels exprimée en unités sur la base de critères mesurables simplement ou prévisibles sur l'animal.

La recherche joue un rôle essentiel dans le progrès des systèmes d'unité d'alimentation, en particulier en améliorant la précision des différentes méthodes de prévision évoquées ci-dessus. Ces systèmes d'unité sont classiquement utilisés à travers une démarche qui va de données relatives à l'animal (poids, performances) à la formulation du régime alimentaire. Les systèmes d'unité d'alimentation sont de ce fait particulièrement adaptés pour permettre l'**expression d'un potentiel de production** sachant que c'est dans cette situation que l'**efficacité de la transformation** aliment-produit est la meilleure. Ainsi, ces systèmes d'unités d'alimentation ont été, avec le progrès génétique, de puissants supports des gains importants d'efficacité alimentaire réalisés depuis plusieurs décennies en production porcine.

Depuis une quinzaine d'années, on assiste cependant à une évolution importante des préoccupations et des objectifs dans les filières des productions animales et des produits. En effet, sans renier le premier objectif d'efficacité alimentaire, une importance croissante est accordée à d'autres critères. Parmi ceux-ci, il convient de citer la **qualité du produit commercialisé** qui se mesure à travers de nombreuses composantes (proportion des tissus gras d'une carcasse, dureté et odeur du tissu gras, présence de résidus d'origine environnementale dans les produits, etc.). D'autre part, plus récemment, en raison des niveaux excessifs de chargements animaux atteints dans certaines régions de la CEE, les rejets animaux de matière organique, d'azote, de phosphore... ne sont plus considérés comme un flux intermédiaire des cycles naturels mais comme des **flux polluants** prenant de ce fait une valeur économique. De nombreux facteurs alimentaires sont connus pour modifier certaines composantes de la qualité ou de la charge polluante, actuellement ils sont essentiellement pris en compte par le jeu de **recommandations alimentaires** (exemples : ratio acides aminés essentiels/énergie, densité énergétique maximale, niveau minimum ou maximum d'incorporation d'un ingrédient, d'un type d'acide gras, d'un additif...).

Cette évolution des préoccupations indique que l'approche classique doit être complétée par la démarche réciproque qui consiste à prévoir **les réponses d'un animal aux variations de son régime alimentaire**. Dans ce contexte, il importe donc

de s'interroger sur la capacité des systèmes classiques d'unité d'alimentation à prédire les lois de réponse des animaux. Il convient également s'interroger sur les démarches ou méthodes alternatives qui pourraient s'avérer nécessaires à mettre en oeuvre pour atteindre pratiquement cet objectif.

1. LES LIMITES DES UNITÉS CLASSIQUES POUR PRÉDIRE LES LOIS DE RÉPONSE

Il est certain que les unités classiques d'alimentation sont capables de rendre des services appréciables pour prévoir les réponses multicritères des animaux aux régimes. Cependant, elles présentent également **des limites** qu'il convient de préciser :

- * En nutrition, il n'y a en général **pas de relation linéaire de cause (ex. : niveau d'ingestion de la ration) à effet (réponses zootechniques)** mais des relations non linéaires. Les unités d'alimentation sont, en pratique, incapables d'intégrer de tels phénomènes de non linéarité des réponses qui traduisent en particulier des variations de la répartition des nutriments absorbés entre les différents tissus de l'organisme,
- * Les principales **interactions digestives** entre les constituants d'une ration (PEREZ, 1991) ou **interactions métaboliques** entre nutriments absorbés (SEVE et BALLÈVRE, 1991) ont été en partie identifiées par la recherche et sont susceptibles d'expliquer certaines variations des lois de réponses, en particulier non linéaires. En pratique, les unités alimentaires font une hypothèse globale trop simple d'absence d'interaction y compris à des niveaux assez évidents de la connaissance (exemple : interactions métaboliques énergie-azote).
- * Les unités actuelles d'alimentation, en particulier pour l'énergie, **agrègent** des constituants donc des nutriments qui possèdent des propriétés physiologiques et nutritionnelles très différentes. Cette agrégation, utile pour disposer d'unités simples, explique largement les limites précédentes, en outre elle limite la précision de la prédiction des quantités synthétisées de protéines, de lipides, de minéraux, de déchets, etc.
- * Les unités d'alimentation sont conçues et appliquées sur la base de **pas de temps d'une journée** et sous l'hypothèse de «**flux tendus**» alors que bien des processus nutritionnels déterminant des réponses aux régimes se produisent selon des **pas de temps plus courts** et peuvent présenter des phénomènes d'amortissement et de délais.

2. L'INTÉRÊT DE LA MODÉLISATION POUR PRÉDIRE LES LOIS DE RÉPONSE

La modélisation des lois de réponse aux régimes constitue une étape méthodologique essentielle de l'évolution des concepts et des outils en alimentation et nutrition animale. Nous avons écrit récemment une synthèse sur cette approche (SAUVANT, 1992). Selon l'objectif et les données disponibles, différents types et sous-types de modèles sont utilisables en nutrition animale. En général, on est amené à distinguer (FRANCE, THORNLEY, 1984) :

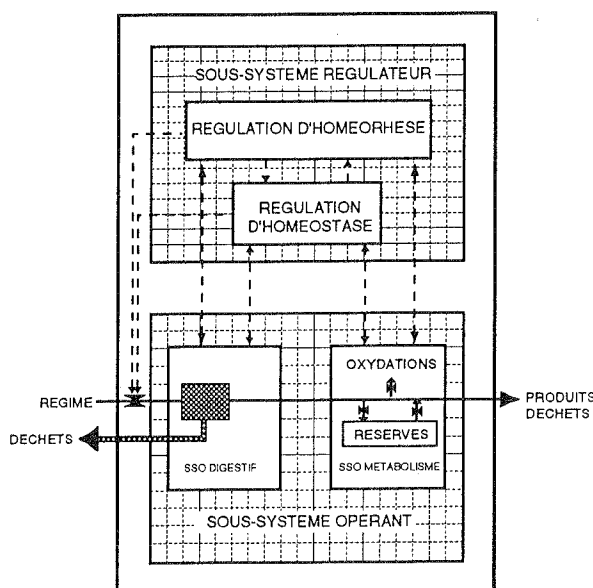
2.1. Les modèles empiriques considèrent le système objet

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 une démarche inverse, par exemple pour prédire le niveau d'ingestion à partir du poids vif et du niveau de performance ou bien pour prédire un besoin en énergie en fonction du poids et des niveaux d'accumulation des protéines et des lipides corporels. Les modèles empiriques peuvent être **statiques**, par exemple s'ils considèrent les valeurs moyennes mesurées sur une période de temps assez brève, ils peuvent être **dynamiques** s'ils intègrent l'influence du temps. Ces modèles peuvent également être **stochastiques** ou **déterministes** selon qu'ils tiennent compte, ou non, de l'incertitude qui entoure tous les paramètres pris en compte.

2.2. Les modèles semi-mécanistes : compte tenu du manque de flexibilité des modèles empiriques évoqués ci-dessus, une amélioration a été obtenue en intégrant la connaissance fournie par la mise au point des **unités d'alimentation**. L'approche consiste à remplacer les flux bruts d'intrants par d'autres flux considérés après une ou plusieurs étapes de l'utilisation de la ration par l'organisme. La démarche classique consiste en particulier à intégrer les événements digestifs en utilisant les flux d'énergie digestible et les flux de protéines, ou acides aminés, digestibles... comme variable prédictive. Ainsi, l'écart-type résiduel de la précision de l'énergie nette des régimes des porcs en croissance est multipliée par un facteur de l'ordre de 0.4 lorsque les éléments digestibles remplacent les éléments bruts (NOBLET et al., 1989).

2.3. Les modèles mécanistes ont pour but de prévoir les réponses d'un système, en l'occurrence l'organisme animal, en intégrant **les relations biologiques sous-jacentes les plus déterminantes**. La première étape de la mise en place d'un modèle mécaniste consiste à définir précisément le système étudié et à identifier les structures et les mécanismes déterminant son fonctionnement. Plus précisément, il convient d'y distinguer deux principaux sous-systèmes qui correspondent entre eux par un réseau informationnel (figure 1) :

Figure 1 - L'organisme vivant vu comme un système régulé



2.3.1. Le sous-système opérant correspond à un ensemble extraordinairement enchevêtré de compartiments reliés par des voies de transferts multiples. En première approximation, on le subdivise en deux : 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...). 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

$$\frac{dQ_i}{dt} = \sum_j F_{ej} - \sum_k F_{sk}$$

2.3.2. 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 systèmes hormonaux de la nutrition** représentent la majeure partie du système régulateur qui détermine des lois de réponse aux régimes. En cohérence avec le concept de téléonomie de MONOD (1970) on distingue deux sous-systèmes régulateurs : les systèmes d'homéostasie et d'homéorhèse (figure 1) qui soutiennent les finalités de survie et pérennité de l'individu et de l'espèce respectivement. **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. **Les régulations d'homéorhèse** (ou téléophorèse) contrôlent les métabolismes en vue d'assurer le bon déroulement d'une fonction physiologique majeure essentielle à la pérennité d'une espèce : la croissance et la reproduction (gestation, lactation). Le contrôle peut s'effectuer, comme pour l'homéostasie, aux niveaux de l'ingestion, de la digestion et de l'utilisation métabolique des nutriments.

La modélisation de l'utilisation métabolique des nutriments ne peut ignorer ces systèmes régulateurs et leurs interactions. Celles-ci, jouent en effet un rôle prépondérant sur la répartition des nutriments entre les tissus. Ainsi GOPINATH et ETHEERTON (1989) et AGERGAARD et al. (1991) ont étudié ces interactions chez le porc en croissance en associant factoriellement des apports de pGH (homéorhèse) avec des challenges de glucose, ou insuline ou adrénaline (homéostasie). Ces essais confirment que l'apport de pGH favorise la protéosynthèse et réduit la lipogénèse et la capacité d'ingestion. Les challenges pratiqués ont permis de montrer que les phénomènes de court terme de lipolyse induite par l'adrénaline étaient exacerbés sous pGH alors que la chute de glycémie et des AGNE sous insuline était atténuée sous pGH. Les variations d'apport des nutriments liés aux repas sont donc moins favorables au développement du tissu adipeux sous pGH.

Jusqu'à présent les recherches sur la nutrition des animaux se sont essentiellement tournées, pour des raisons de possibilités expérimentales, vers une meilleure connaissance du sous-système opérant : on connaît ainsi de façon assez satisfaisante le **descriptif qualitatif** de l'organisme (= schéma de l'ensemble des compartiments et voies de transferts). 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 certaine **information quantitative** de la nutrition de l'organisme, comme SEVE et BALLEVRE (1991) l'ont montré pour le métabolisme des acides aminés. Par contre, le système régulateur est moins connu et ne peut être l'objet de modélisation construite sur la base des résultats des mesures expérimentales. Dans une synthèse récente (SAUVANT, 1994), nous avons fait le point des modèles existants de systèmes régulateurs de la nutrition de l'animal en lactation. Il apparaît que, par manque de données expérimentales, les modèles utilisés à ce niveau sont largement théoriques. Ceci veut dire qu'à court terme la démarche modélisatrice permettant par exemple de simuler les réponses globales à l'apport de pGH (BONNEAU, 1990) devra vraisemblablement être en partie théorique. Cependant il est vraisemblable que le développement futur des techniques d'investigation fine des systèmes hormonaux (régulation de la sécrétion et de la dégradation des hormones, nombre, turnover et réceptivité des récepteurs, mécanismes cellulaires...) va permettre de progresser rapidement sur la modélisation des régulations.

3. RÉALISATION DE MODÈLES DE LOIS DE RÉPONSE

3.1. Typologie selon le degré d'agrégation des phénomènes biologiques

Différents types de modèles de la nutrition du porc ont été proposés. Cela va depuis des modèles simples et agrégés de la partition des nutriments (WHITTEMORE et FAWCETT, 1974 ; FOWLER, 1978 ; BURLACU et al., 1988) à des modèles détaillés jusqu'à la description des principales voies biochimiques (SCHULZ, 1978 ; STOMBAUGH et OKO, 1980). Les principales limites sont la trop grande simplicité pour les premiers et le manque d'informations expérimentales et sur la régulation pour les seconds. Entre ces deux extrêmes, on trouve des modèles intermédiaires incluant une partie de contrôle biologique (BLACK et al., 1986) notamment grâce à une programmation des modifications physiologiques qui interviennent dans le temps.

3.2. Les modèles d'ingestion

La prédiction des réponses de l'animal doit s'intéresser aux réponses intermédiaires aux étapes «sensibles», c'est-à-dire les plus déterminantes de ces réponses. Ainsi la réponse de l'ingestion de matière sèche en fonction de paramètres alimentaires tels que la densité énergétique (GROSJEAN et al., 1988), l'équilibre en acides aminés (NOBLET et al., 1990), etc., doit être prise en compte pour espérer obtenir un modèle global réaliste, en particulier dans le contexte actuel du développement de l'alimentation ad libitum des génotypes améliorés (CAMPBELL et TAVERNER, 1985). Il semble qu'à l'heure actuelle l'ingestion représente un paramètre très sensible mais peu considéré dans les modèles proposés. Ceci provient vraisemblablement de la difficulté à définir de façon mécaniste les facteurs de variation ou régulateurs de l'ingestion. De ce fait les modèles se tournent vers des

solutions empiriques, ainsi le modèle empirique d'ingestion d'énergie proposé par le NRC (1987) a été utilisé comme «force motrice» déterminante par DELANGE (1993), ce qui semble être une des principales limites de ce modèle proposé pour le porc en croissance.

3.3. Les modèles de digestion

3.3.1. Les modèles empiriques

L'approche empirique correspond au concept de digestibilité, coefficient qui considère tout ou partie du tube digestif comme une «boîte noire» et qui permet de quantifier le flux apparemment absorbé à partir de la mesure des flux d'entrée et de sortie. Un rapprochement de ce concept avec la réalité physiologique est recherché par la mesure de la digestibilité réelle et de la digestibilité par segment. Il convient cependant de remarquer que le «passage» à la digestibilité réelle ne peut se faire sans appliquer différentes hypothèses de calculs (cf estimation des flux endogènes...) dont les conséquences peuvent être quantitativement importantes. Compte tenu du rôle déterminant de la digestion dans la valorisation des aliments par les porcs, de nombreuses études se sont attachées à l'explication et à la prévision de la digestibilité des constituants des régimes.

3.3.2. Les modèles mécanistes

À notre connaissance, aucun modèle mécaniste de la digestion de l'animal monogastrique n'a été publié avant 1994, alors que plusieurs modèles ont déjà été publiés chez l'animal ruminant, en particulier pour le réticulo-rumen (SAUVANT, 1988). En effet, les modèles les plus sophistiqués de la nutrition du porc, cité plus loin, ont en réalité simplifié à l'extrême le maillon digestif de l'utilisation des aliments.

Dans le cadre d'un travail de thèse, BASTIANELLI et coll. (1994) ont développé un modèle mécaniste de la digestion de l'animal monogastrique en se référant dans un premier temps essentiellement au porc pour les valeurs de paramètres. Quatre compartiments ont été distingués : l'estomac, le duodénum, le jéjunum et l'ensemble gros intestin + caecum. Ce modèle constitue la première étape d'un modèle capable de simuler les événements digestifs et les flux de nutriments absorbés les plus probables consécutifs à l'ingestion d'un aliment donné. Il devrait permettre de faire progresser les méthodes d'évaluation des aliments, pourra être associé ultérieurement à un modèle d'utilisation métabolique des nutriments. Un autre modèle mécaniste de la digestion des protéines dans l'intestin du porc a été publié récemment (RIVEST et al 1994).

3.4. Les modèles de métabolisme

Ces modèles doivent en particulier aider à résoudre le problème de l'intégration des variations de la répartition des nutriments entrants au sein de l'organisme. Cette répartition est la résultante de la confrontation entre, d'une part, les facteurs régulateurs d'homéorhèse qui tendent à appliquer le programme génétique de croissance (ou de lactation) de l'animal considéré et, d'autre part, les variations des apports alimentaires qui sont «gérés» par le système régulateur d'homéostasie qui joue en quelque sorte un rôle de tampon dynamique entre apports et besoins (SAUVANT, 1993). À notre connaissance, aucun modèle (mécaniste ou non) actuel intègre de façon satisfaisante ces différents aspects,

cependant plusieurs modèles intéressants et utiles ont déjà été publiés sur l'utilisation des nutriments absorbés.

3.4.1. Les modèles empiriques

Les courbes de croissance, et des besoins nutritifs associés, ont été l'objet d'une grande attention de la part des biométriciens si bien qu'aujourd'hui de nombreuses équations; à 3 ou 4 paramètres, peuvent être utilisées pour les ajuster. Ces équations, plusieurs fois utilisées dans des modèles porcs, constituent en fait une grande simplification de la réalité à laquelle elles s'ajustent en général mal (CRENSHAW et al. 1986). La raison majeure est que les équations disponibles ne contiennent qu'un «projet unique» (homéorhèse) qui se déroule inexorablement et n'admet pas d'irrégularité d'évolution en fonction des facteurs de variation du milieu environnant.

Différents modèles empiriques ont été proposés pour prévoir les quantités de protéines et de lipides corporels déposés à partir de la connaissance de la ration ingérée par la truie (DOURMAD, 1987) ou le porc en croissance (WHITTEMORE, 1983). Des modèles de ce type ont également été établis pour prédire les flux de perte d'azote chez le porc (GUILLOU et al., 1993).

3.4.2. Les modèles mécanistes, exemples

3.4.2.1. Le chercheur danois A. DANFAER, qui a publié en 1991 le premier modèle mécaniste complet de la digestion et du métabolisme de la vache laitière, a travaillé également sur le porc en croissance. Son premier travail a porté sur la recherche d'un modèle très simple qui soit capable de générer une **croissance présentant un point d'inflexion** à partir de l'évolution combinée de flux métaboliques d'anabolisme et de catabolisme des tissus. En outre, ce modèle cherche à intégrer le plus simplement possible, un processus de contrôle métabolique de la répartition des nutriments entre les processus de synthèse et d'oxydation. Le principe s'appuie sur la disponibilité en ATP qui est synthétisé à partir du processus d'oxydation et qui sert à l'entretien (prioritaire) et au fonctionnement des voies anabolique et catabolique.

La figure 2 présente le diagramme de ce modèle. Le pool des nutriments (N) et des réserves (R) sont liés par un flux anabolique (F_a) et catabolique (F_c). Un des intérêts de ce modèle concerne le fait qu'il est capable de traduire l'existence d'un point d'inflexion à la croissance à partir de la combinaison d'évolutions exponentielles décroissantes des flux F_a et F_c . En effet :

- Le taux fractionnaire (F_c/R) est supposé décroître à mesure de la croissance, d'une valeur maximale ($F_c \text{ max}$) à une valeur minimale non nulle ($F_c \text{ min}$)

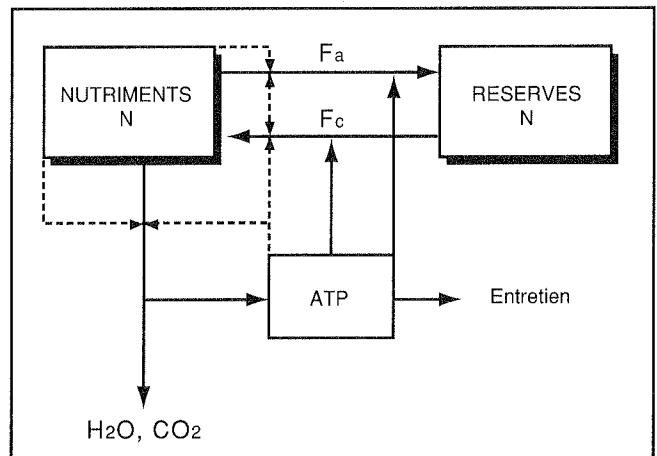
$$F_c/R = F_{c \text{ min}} + F_{c \text{ max}} \cdot \exp(-k_c \cdot R)$$

- Le taux fractionnaire anabolique (F_a/R) est supposé décroître également d'une valeur maximale ($F_a \text{ max}$) à un minimum non nul ($F_a \text{ min}$)

$$F_a/R = F_{a \text{ min}} + F_{a \text{ max}} \cdot \exp(-k_a \cdot R)$$

La croissance est obtenue par le fait que $F_a \text{ max} > F_{c \text{ max}}$, et que les valeurs de k_a et k_c sont telles que $F_a > F_c$. L'état d'équilibre dynamique sans croissance de l'adulte est obtenu

Figure 2 - Diagramme d'un modèle mécaniste simple de la croissance du porc (DANFAER, 1990)



grâce à l'égalité $F_a \text{ min} = F_c \text{ min}$. L'allure de la courbe de croissance est obtenue par l'intégration dans le temps de la différence $F_a - F_c$.

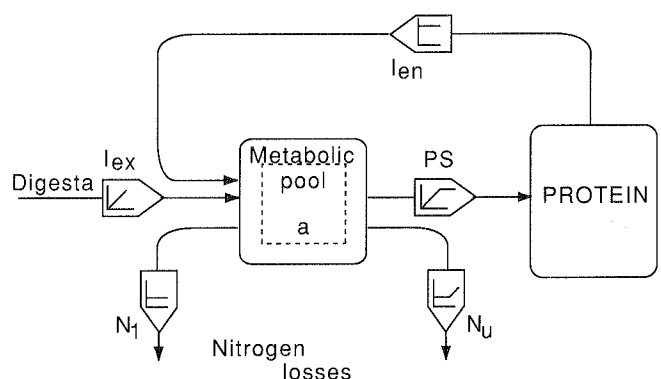
Dans ce modèle, le flux d'utilisation (F_u) des nutriments sont des fonctions non linéaires de la quantité N présente dans ce pool

$$F_u = F_a + F_{ox} = F_{am} (1 + k/n)^{-1} + F_{oxm} (1 + k_{ox}/N)^{-1}$$

Les ATP formés à partir du flux oxydatif (F_{ox}) sont utilisés pour l'entretien, l'anabolisme et le catabolisme selon des taux estimés à travers des connaissances biochimiques de base. Selon la taille du pool d'ATP, il y a une activation ou une inhibition des voies du catabolisme ou de l'oxydation.

3.4.2.2. SICK (1991) a fait une description résumée d'un modèle original de métabolisme des acides aminés chez le monogastrique, le rat en particulier, pour simuler la réponse de la partition des AA aux apports alimentaires. La figure 3 rapporte le diagramme de base de ce modèle. Son originalité vient de l'hypothèse que le pool métabolique des acides aminés est divisé en deux sous-ensembles, l'un correspondant exactement aux besoins de protéosynthèse, l'autre, qui

Figure 3 - Diagramme du modèle de SICK (1991) (reproduit de la référence)



4.2. Optimisation statique

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). La principale limite de ce travail vient de la fixité du gain de poids qui est considéré comme une donnée d'entrée (cf. l'approche classique).

Un cas simple de l'approche statique consiste à considérer que la vitesse de croissance de l'organisme dépend, selon une loi des rendements décroissants, du niveau des apports alimentaires. L'indice de consommation passe par un minimum pour un couple de valeurs de GMQ et probablement de niveau alimentaire inférieur aux potentiels. La détermination d'un optimum de concentration en «énergie équilibrée» (ratios constants entre les composantes nutritives et la concentration en énergie) a été la démarche statique la plus pratiquée.

4.3. Optimisation dynamique

La définition d'une stratégie alimentaire optimale pour atteindre le stade d'abattage constitue une des problématiques abordées il y a déjà assez longtemps. Ainsi, CRABTREE (1977) avait proposé un modèle permettant d'optimiser la stratégie d'alimentation du porc en croissance en fonction du contexte économique. D'autre part, KENNEDY et al. (1976) ont appliqué la **programmation dynamique** pour définir une stratégie alimentaire optimale du poulet. Ce programme travaillait par intervalle de temps d'une semaine, il utilisait des relations empiriques de prédiction des caractéristiques de gain de poids, d'énergie ingérée, de rendement et de mortalité cumulée.

Des approches dynamiques d'optimisation en temps continu, et non discret comme précédemment, 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.

4.4. Modèles intégrés

Certains modèles ont été intégrés au sein de packages

d'optimisation et permettent de pouvoir disposer dès à présent d'un outil flexible et rapide. Ainsi le programme AUSPIG (BLACK et al., 1986) intègre un processus de croissance et nutrition associé à un programme de formulation à moindre coût, à un programme de gestion de l'atelier de production et à des systèmes experts permettant d'aider une démarche de diagnostic d'élevage. Les résultats de démonstration de ce produit sont assez séduisants (SCHREUR, 1993), on peut cependant regretter l'aspect de «boîte noire» des versions commercialisées qui ne permet pas, d'une part, de prendre le recul nécessaire à une bonne utilisation du produit et, d'autre part, d'être certain qu'il est bien adapté à tel ou tel contexte pratique (génotype, condition d'élevage...).

CONCLUSIONS

Les productions porcines sont particulièrement concernées par l'élargissement de l'éventail des critères d'évaluation de l'activité d'élevage. A ce titre, elles doivent avoir la capacité de s'adapter à l'évolution des contextes techniques, économiques, sociaux et même psychologiques. Cette adaptation passe par l'affirmation de la démarche «loi de réponse» qui vient en complément, et non en opposition, de l'approche classique. En effet, seule cette nouvelle approche peut prendre en compte simultanément les différents objectifs d'efficacité, de qualité, de contrôle des rejets... et permettre de définir un régime économiquement optimal réalisant forcément un certain degré de compromis entre ces différentes contraintes.

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. Cependant, il est logique de se demander s'ils sont entièrement aptes à aider à résoudre les nouvelles questions auxquelles l'élevage est confronté.

Les modèles mécanistes semblent pouvoir être capables d'assurer un certain renouveau, non seulement pour le producteur en l'aidant à définir des régimes plus profitables, mais également pour 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. Il ne faut cependant pas se bercer d'illusions, la modélisation mécaniste n'est pas une voie facile, c'est une voie de recherche appliquée dont des résultats probants et directement utilisables ne sont disponibles qu'après un délai de temps souvent plus important que ce qui était initialement envisagé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGERGAARD N., OKSBJERG N., SORENSEN M.T., 1991. In : Proc. 6th Int. Symp. Protein Metabolism and Nutrition, p. 194-197, Ed. EAAP-NIAS. Foulum, Danemark.
- DELANGE., de LANGE, C.F.M., 1993, In : International Course «Modelling growth in the pig», WAGENINGEN.
- BASTIANELLI D., SAUVANT D., 1994, Symposium Modelling Nutrient Utilization in Farm Animal (Foulum, Danemark)
- BASTIANELLI D., SAUVANT D., 1994. Journées Rech. Porcine en France, 26, 227-234.
- BLACK J.L., CAMPBELL R.G., WILLIAMS I.H., JAMES K.T., DAVIES G.T., 1986. Research and Development in agriculture 3, 121-145.
- BONNEAU M., 1990. Journées Rech. Porcine en France, 22, 51-68
- CAMPBELL R.G., TAVERNER M.R., 1985. Symp. Energy metabolism in Farm animals, EAAP, Airlee, Virginia, USA.
- CHABTREE J.R., 1977. J. Agric. Economics, 28, 1, 39-52.
- CRENSHAW T.D., BOYD R.D., ORR D.E., 1986. J. Anim. Sci., 63, 613-614
- 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.

- FOWLER, 1978.
- GOPINATH R., ETHERTON T.D., 1984. *J. Anim. Sci.*, 67, 682-697.
- GROSJEAN F., CASTAING J., WILLEQUET F., QUÉMÉRÉ P., 1988. *Journées Rech. Porcine en France*, 20, 381-386.
- GUILLOU D., DOURMAD J.Y., NOBLET J., 1993. *Journées Rech. Porcine en France*, 25, 307-314.
- MOUGHAN P.J., 1985. *New Zeal. J. Agric. Res.*, 28, 463-468
- 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 ed., Paris, 106 p.
- PEREZ J.M., 1991. *Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II.*
- SAUVANT D., 1988. *Rep. Nutr. Dev.* 28, 33-58.
- SAUVANT D., 1992. *Rep. Nutr. Dev.*, 32, 217-230.
- SAUVANT D., 1994. *Livest Prod. Sci* (39, 105-113).
- SCHREURS H.W.E., 1993. In *International Course «Modelling growth in the pig»*, WAGENINGEN.
- SÈVE B., BALLÈVRE O., 1991. *Journées Rech. Porcine en France*, 23, 91-110.
- SHULZ A.R., 1978. *British J. Nutr.* 39, 235-254
- SICK H., 1991, *Proc. 6th Int. Symp. on protein metabolism and nutrition*. p. 349-351. Ed. EAAP-NIAS Foulum (Danemark).
- STOMBAUGH D.P., OKO A., 1989. In *energy metabolism*, p. 209-215, Ed L.E. MOUNT.
- 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