

# Le concept de lois de réponses multiples aux régimes, trait d'union entre les domaines techniques et économiques de l'élevage

D. SAUVANT

INAPG-INRA, 16, rue Claude-Bernard, 75231 PARIS Cedex 05

**RESUME** – Les défis et contraintes liés à la qualité des produits, à l'impact des élevages sur l'environnement et au respect du bien être des animaux sont devenus essentiels dans les filières animales. L'approche classique de l'alimentation des animaux, qui consistait à couvrir les besoins d'un animal pour permettre d'exprimer son potentiel de production est incapable de répondre à ces nouvelles attentes. Par contre le concept de loi de réponse multiple (LRM) aux variations du régime semble être le meilleur moyen de les intégrer à travers des paramètres représentatifs des réponses des performances, de l'efficacité de la transformation, de l'impact sur l'environnement, sur la qualité des produits, sur la santé et sur le bien être des animaux.

L'élaboration des LRM se fait à l'aide d'expériences spécifiquement conçues ou à partir de l'interprétation de bases de données quantitatives. Différents aspects doivent être pris en compte à propos des LRM, il s'agit en particulier du niveau organisationnel considéré, des relations systémiques entre certaines réponses, des composantes aléatoires et dynamiques des réponses et de la pertinence des paramètres explicatifs ou de réponses par rapport à des objectifs pratiques. L'approche LRM devrait tirer un large profit de la modélisation systémique, celle-ci permet en effet de prendre en compte les contrôles endogènes et exogènes des voies métaboliques et de les modéliser sous une forme utilisable en pratique. Le concept de LRM peut s'appliquer à des systèmes plus intégrés : troupeau, système d'élevage... Cependant, un fossé existe entre les LRM des animaux, déterminées par expérimentation et les caractéristiques des systèmes de production qui sont connues grâce à des enquêtes en situation. Il est important de chercher à combler ce fossé.

Les LRM modélisées présentent l'intérêt de fournir des bases intéressantes d'interprétations économiques, à partir du moment où les flux techniques peuvent être transcrits en termes monétaires. Cette dernière étape soulève des problèmes dans le cas des fourrages ou des flux de rejets d'N, de P ou de CH<sub>4</sub>.

## The concept of multiple responses to diet as a link between technical and economical aspects in animal production

D. SAUVANT

INAPG-INRA, 16, rue Claude-Bernard, 75231 PARIS Cedex 05

**SUMMARY** – New challenges and constraints linked to quality of products, to environmental impact of livestock production and to animal welfare became essential in animal chains. The classical approach of feeding animals to meet their requirements and express their potential is unable to tackle these new challenges. In contrast, the concept of multiple law of responses (MLR) to diet variations appears to be the best way to take simultaneously into account the responses of performance, of feed efficiency, impact on environment, on quality of products, on animal health and well being.

Building of MLR is based on specific experimentations or on the meta analysis of data bases from literature. Various aspects have to be taken into consideration for elaborating MLR: the considered level of organization, the systemic relationships between some parameters, the stochastic and dynamic components of responses and the degree of relevance of the explicative parameters. The MLR approach takes a large profit from systemic modeling. It allows to integrate the endogenous and exogenous controls of metabolic flux which determine responses to diet. Moreover systemic modeling present animal responses under a form useable in practice. The MLR concept has also to be applied to larger systems : herd, production system... However it appears a gap between the MLR of animals, which are experimentally determined, and the items of systems of production which are obtained by inquiries at farm level. It is important to bridge this gap.

The models of MLR present have the interest to provide interesting bases of economical interpretation if the technical flows can be interpreted in monetary terms. This aspect raise problems in the case of forage cost or for the production of N, of P or of CH<sub>4</sub>.

## INTRODUCTION

### Des objectifs multiples...

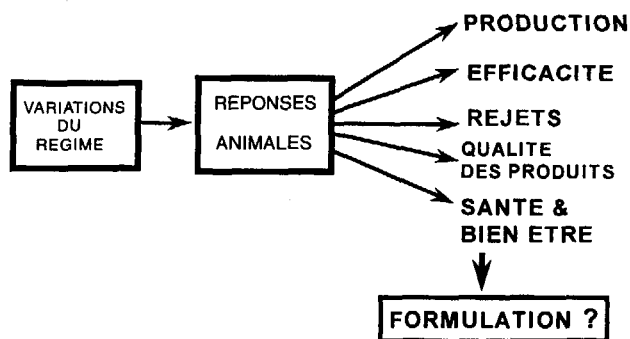
Les filières animales sont actuellement soumises à une diversification de leurs objectifs et de leurs contraintes. Il y a une cinquantaine d'années, l'émergence des recherches en économie rurale avait privilégié le souci de **rentabilité**, qui passe notamment par un **gain de performance** et d'**efficacité biologique** de la transformation des aliments par les animaux. A cet objectif s'est ajouté, à partir des années 60, un intérêt croissant vis-à-vis de la **composition du produit** élaboré. Cette préoccupation a évolué vers la notion de **qualité des produits** qui a pris de nos jours une importance considérable tout en se diversifiant (qualité diététique, sécurité alimentaire...). Ultérieurement, l'intensification agricole de certaines régions a entraîné des problèmes de **surexploitation** et/ou de **pollution** du milieu environnant qui obligent à mettre en œuvre des recherches spécifiques et à prendre des mesures appropriées. A l'opposé, l'apparition de **zones de déprise agricole** soulève le problème de leur entretien et de la place de l'animal dans ce processus. Enfin, il convient désormais d'intégrer le développement des préoccupations liées au respect du **bien-être de l'animal d'élevage**.

### aux lois de réponse multiples

L'accumulation en quelques décennies de ces différents objectifs, ou contraintes, ou manières de considérer les productions animales "interpelle" l'ensemble des partenaires scientifiques et techniques des filières, en particulier dans le domaine de la **nutrition et de l'alimentation des animaux**. La **démarche classique** du calcul des régimes alimentaires, destinée à **couvrir les besoins nutritifs** d'un animal de potentiel génétique connu ne peut s'adapter à ce nouveau contexte. La multiplicité des objectifs évoqués incite à adopter la **démarche réciproque et complémentaire** qui consiste à déterminer les **lois de réponses multiples (LRM)** des animaux en fonction des variations de leur régime alimentaire (**figure 1**). Il importe donc de réfléchir à ce **nouveau paradigme de l'alimentation animale**, en particulier aux conséquences qu'on peut en attendre en matière de **gestion des exploitations et développement de l'élevage**. Ce concept de LRM peut s'appliquer aux **différents niveaux organisationnels** d'un élevage ; cependant, ce texte privilégie le "maillon animal", système au niveau duquel la réflexion semble devoir être initiée.

Figure 1

Contraintes des filières l'approche « loi de réponse »



## 1. HISTORIQUE DU CONCEPT DE LOIS DE REPONSE AU REGIME

Ce sont dans des **universités américaines** que des réponses zootechniques aux variations du régime ont, semble-t-il, été considérées pour la première fois (Yates et al., 1942). Celles-ci indiquaient des courbes de réponses de la production laitière de vaches en fonction des apports d'énergie. Ces courbes ont été reprises dans **l'enseignement et le développement** il y a 40 ans (J. Coléou, 1960). En France, les ouvrages de référence édités par l'INRA (Jarrige, 1978 et 1988) n'évoquent pas explicitement le concept de **réponses des animaux aux régimes**. Cependant, certaines réponses zootechniques sont déjà implicitement évoquées dans ces ouvrages, ainsi le **coefficient de substitution concentré/fourrage** (Demarquilly et al, 1978) constitue un paramètre déterminant des réponses

zootechniques aux variations de l'apport des aliments concentrés. A la même période, les LRM n'ont pas été évoquées dans les ouvrages étrangers équivalents alors qu'elles y sont maintenant privilégiées (AFRC, 1998). Les premières publications de chercheurs français présentant des synthèses de réponses zootechniques à des variations du régime ont sans doute été celles des réponses de l'ingestion et de la production des vaches laitières aux variations du taux azoté de la ration (Journet, 1983) et de l'apport en PDI (Vérité et Geay, 1987, Vérité et Peyraud, 1988). Actuellement le logiciel INRATION formalise les réponses marginales moyennes de l'ingestion de tous les ruminants et en plus de celles la production et du TP du lait à l'apport de concentré chez la vache laitière.

D'un point de vue conceptuel, les LRM aux régimes n'ont été effectivement présentées et discutées qu'assez rarement (Sauvant, 1992). Ce concept sert de structuration à certains enseignements (INAPG-CSAAD) depuis plus d'une dizaine d'années.

## 2. L'ELABORATION DES LOIS DE REPONSES AUX REGIMES

Différentes sources de données et méthodes d'approches peuvent être mises en œuvre pour élaborer des réponses zootechniques. Une distinction peut être faite entre celles qui font appel à des travaux expérimentaux spécifiques et celles qui font appel à des activités de veille scientifique ou technique.

### 2.1. LES SCHÉMAS EXPÉRIMENTAUX ADAPTÉS

Les **dispositifs expérimentaux classiques** ne sont pas bien adaptés pour définir les LRM à partir d'un même ensemble de données expérimentales. Différents auteurs, en particulier Dillon (1968), ont discuté ces aspects et ont présenté des **schémas expérimentaux factoriels** plus adaptés à la détermination des réponses animales. Ces problématiques expérimentales, aboutissant à des surfaces de réponse, ont été abordées d'un point de vue plus théorique dans certains ouvrages statistiques (Cochran et Cox, 1968).

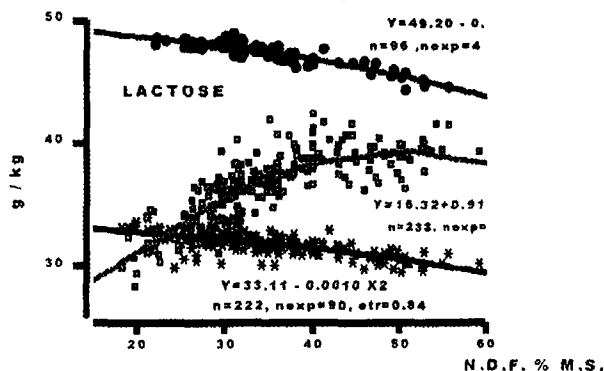
A ce jour, une faible proportion des publications relate des expériences conçues pour prédire ou comprendre des réponses des ruminants à leur régime. La principale raison est vraisemblablement la lourdeur et le coût des dispositifs expérimentaux adaptés. En outre, même lorsqu'elle est conduite pour déterminer une loi de réponse, une seule expérimentation ne peut prétendre intégrer toute la diversité des contextes pratiques et de ce fait dégager des lois à portée générale.

### 2.2. LES ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES QUANTITATIVES

Dans de nombreux domaines, les efforts de recherche des dernières décennies ont été suffisamment conséquents pour permettre de disposer d'un **nombre important de publications cohérentes** quant aux objectifs expérimentaux poursuivis. Il est alors possible d'adopter une démarche de **veille scientifique quantitative** en regroupant ces informations associées aux codages utiles pour en extraire des lois de réponses. Cette pratique existe également dans le domaine médical où elle est appelée "**méta-analyse**".

Ces analyses correspondent à l'analyse statistique de dispositifs expérimentaux inhabituels puisque le tableau des données comporte des données manquantes réparties de façon désorganisée, ce qui implique la mise en œuvre de pratiques statistiques spécifiques. Ainsi, il est préférable de travailler avec des **relations linéaires** ou faiblement curvilinéaires entre les variables prises 2 à 2. Par exemple, les réponses de la composition du lait en fonction de la teneur en fibre chimique (NDF) de la ration chez la vache laitière, et vraisemblablement de la chèvre et la brebis, suivent des lois faiblement curvilinéaires (**figure 2**). Par contre, le pH de la panse, critère d'évaluation du risque d'acidose, répond selon un seuil aux variations de la teneur en NDF de la ration (Sauvant, Mertens, 1998 ; Sauvant et coll., 1999). Compte tenu de la variabilité inter expérimentale de la valeur de ce seuil, il est difficile d'en déduire une recommandation précise.

Figure 2  
Influence de la teneur en N.D.F. du régime sur la composition du lait



Données sur vaches laitières, synthèse bibliographique (D. Sauvant & D. Mertens, np)

Le moyen le plus efficace pour étudier ces données est d'appliquer des modèles d'analyse de variance-covariance. L'effet qualitatif prend en compte les différences entre expériences. La variable quantitative, qui correspond à la réponse au régime, est considérée comme une covariable, elle est prise en compte de façon linéaire ou quadratique. La portée générale de relations intra expérience est a priori intéressante compte tenu du nombre et de la diversité des données prises en compte. Ces approches peuvent aussi permettre de mettre en évidence des interactions entre covariables et facteurs. Lorsqu'elles sont significatives et présentent un intérêt pratique, elles enrichissent le modèle de réponse. L'explication de l'effet expérience doit être recherchée en le confrontant à d'autres critères explicatifs, qualitatifs ou quantitatifs.

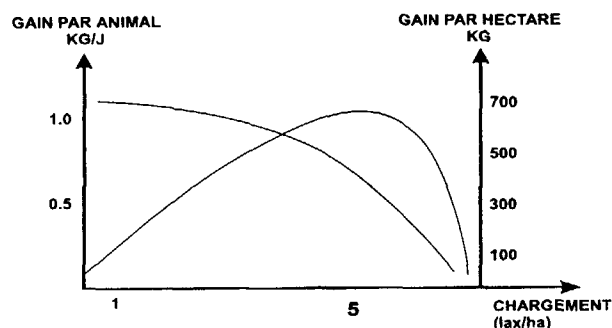
Ces méthodes de méta-analyse ont déjà été mises en œuvre dans le cadre de la mise au point de certains systèmes d'unités alimentaires, elles ont par contre été peu pratiquées dans le cadre des réponses zootechniques des animaux. Il serait donc important de démarrer de tels chantiers.

### 3. CONSIDERATIONS A PRENDRE EN COMPTE DANS L'APPROCHE " LOIS DE REPNSES AUX REGIMES "

#### 3.1. L'IDENTIFICATION ET LA PRISE EN COMPTE DES NIVEAUX ORGANISATIONNELS

Les systèmes de production animale correspondent à une organisation hiérarchique en différents niveaux emboîtés : exploitation, système fourrager, parcelle, troupeau, atelier, animal, organe... Il importe de bien préciser à quel niveau d'organisation une réponse doit être étudiée et recherchée (Béranger et al., 1998). En effet, pour un même facteur de production, des contradictions importantes peuvent apparaître d'un niveau à l'autre. Ainsi, l'influence du chargement animal de la surface fourragère aboutit à des contradictions entre les réponses moyennes de l'individu et de la parcelle (figure 3).

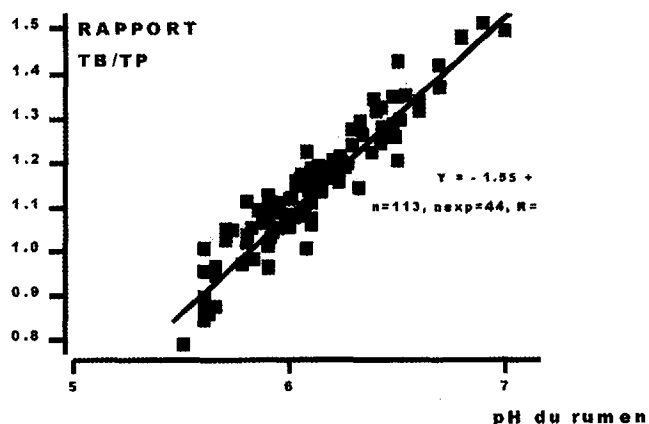
Figure 3  
Influence du chargement de la surface sur l'engraissement de bovins au pâturage (C. Beranger, INRA)



3.2. LES RELATIONS FONCTIONNELLES ENTRE LES REPONSES  
A un même niveau organisationnel, il importe de mettre en évidence et d'intégrer les relations systémiques associant les

différentes composantes des réponses multiples. Celles ci traduisent l'existence de fonctions ou structures sous-jacentes spécifiques. Ces relations peuvent faire apparaître des contradictions entre des objectifs recherchés. Par exemple, chez les bovins, caprins et ovins, il existe une relation positive nette entre le pH du rumen, paramètre indicateur qui ne doit pas être faible (risque d'acidose), et le rapport TB/TP du lait qu'on cherche actuellement à minimiser. La figure 4 indique cette relation dans le cas des vaches laitières, espèce pour laquelle les données disponibles sont les plus nombreuses. Ce fait montre qu'il est vain de vouloir optimiser simultanément tous les paramètres et qu'un optimum global constitue forcément un compromis.

Figure 4  
Relation entre le rapport TB/TP du lait et le pH du rumen



Synthèse d'essais où le facteur expérimental était le % de concentré (D. Sauvant & D. Mertens, np)

D'autre part, les relations fonctionnelles entre paramètres peuvent varier selon le facteur déterminant et/ou l'angle de considération du problème. Ainsi les taux protéiques et butyreux du lait des femelles ruminant sont des caractères liés de façon positive, vu sous l'angle de la génétique ou du stade physiologique, mais de façon négative lorsqu'on les considère en fonction du niveau d'apport énergétique (figure 2). Ces composantes relationnelles sont importantes à considérer et à hiérarchiser lorsqu'on cherche par exemple à mieux comprendre les déterminants de ces relations au niveau du système de production (effets troupeaux : Vissac, 1991, Agabriel et al., 1993).

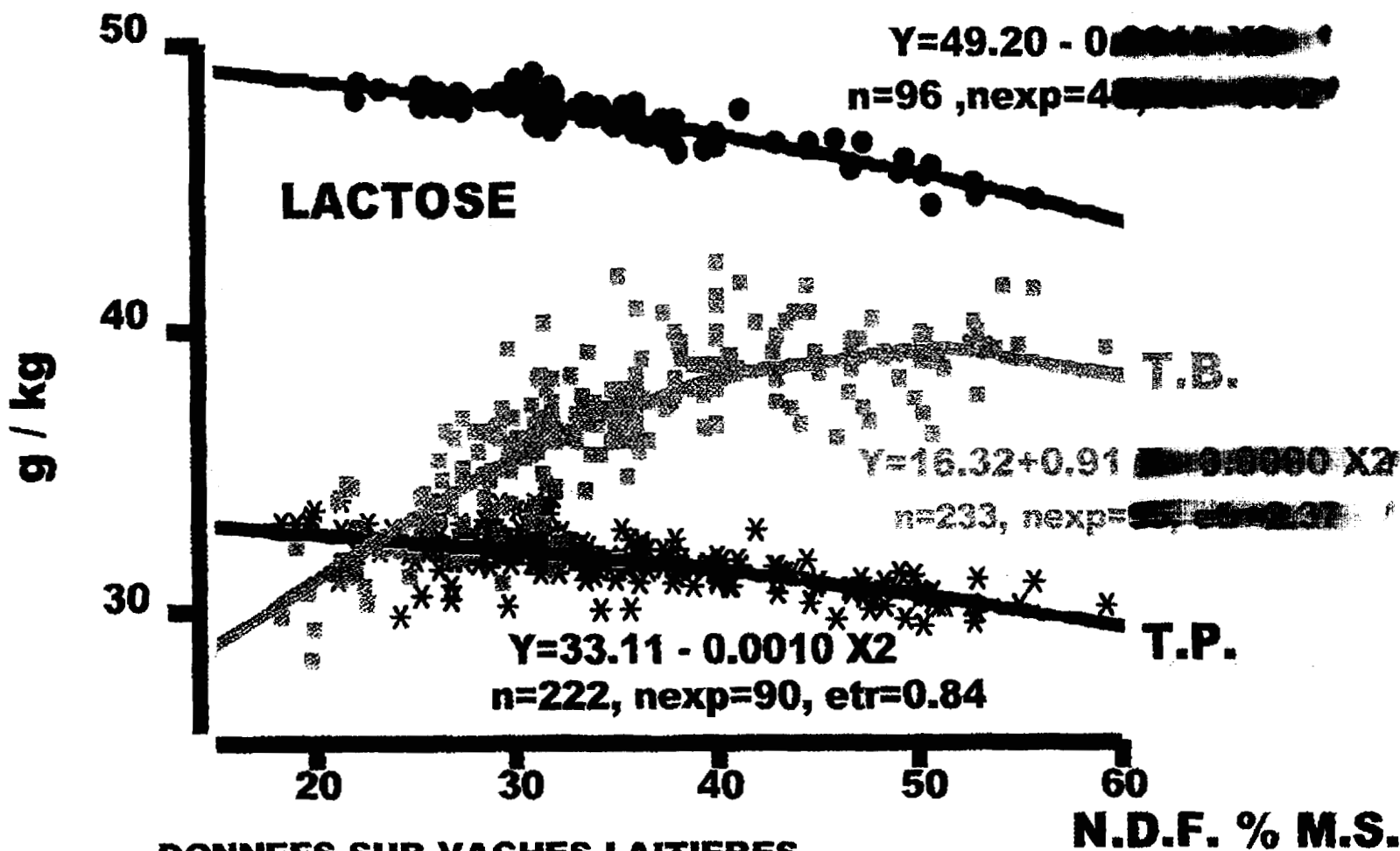
#### 3.3. LES COMPOSANTES DYNAMIQUES DES REPONSES

La plupart des données expérimentales disponibles en nutrition et alimentation des ruminants sont de nature statique, car les données correspondent à des moyennes effectuées pendant une période de temps limitée. La plupart des modèles publiés à ce jour n'intègrent donc pas les phénomènes dynamiques se déroulant sur des échelles de temps de plusieurs semaines ou mois. Or il a été montré que le stade physiologique interférait avec les réponses. De plus les fonctions biologiques associées à l'ingestion, la digestion, la croissance et la lactation, se caractérisent par l'existence d'effets rémanents. En conséquence, l'alimentation subie pendant une période présente non seulement des effets instantanés mais aussi des influences à la période suivante (cf. les phénomènes de croissance compensatrice dans différentes productions). L'approche lois de réponses doit donc chercher à considérer ces aspects dynamiques de manière à pouvoir offrir des modèles utilisables pour définir et choisir par exemple des stratégies alimentaires sur une croissance ou sur une ou plusieurs lactations. Des modèles mécanistes de croissance des ruminants ont été proposés (Schmidely, 1996), dans le cas de la lactation, des chantiers existent (Martin et coll., 1998 ; Roguet et Faverdin, 1999)

Ce domaine des LRM présente l'intérêt d'établir des liens avec les recherches consacrées aux itinéraires techniques en élevage et aux carrières des animaux. D'autre part, la note d'état corporel présente l'intérêt d'être un paramètre intégrateur du temps simple à mesurer et utilisable pour rendre compte d'une partie au moins des effets rémanents, sur l'ingestion, la varia-

Page 13

# INFLUENCE DE LA TENEUR EN N.D.F. DU REGIME SUR LA COMPOSITION DU LAIT



DONNEES SUR VACHES LAITIERES

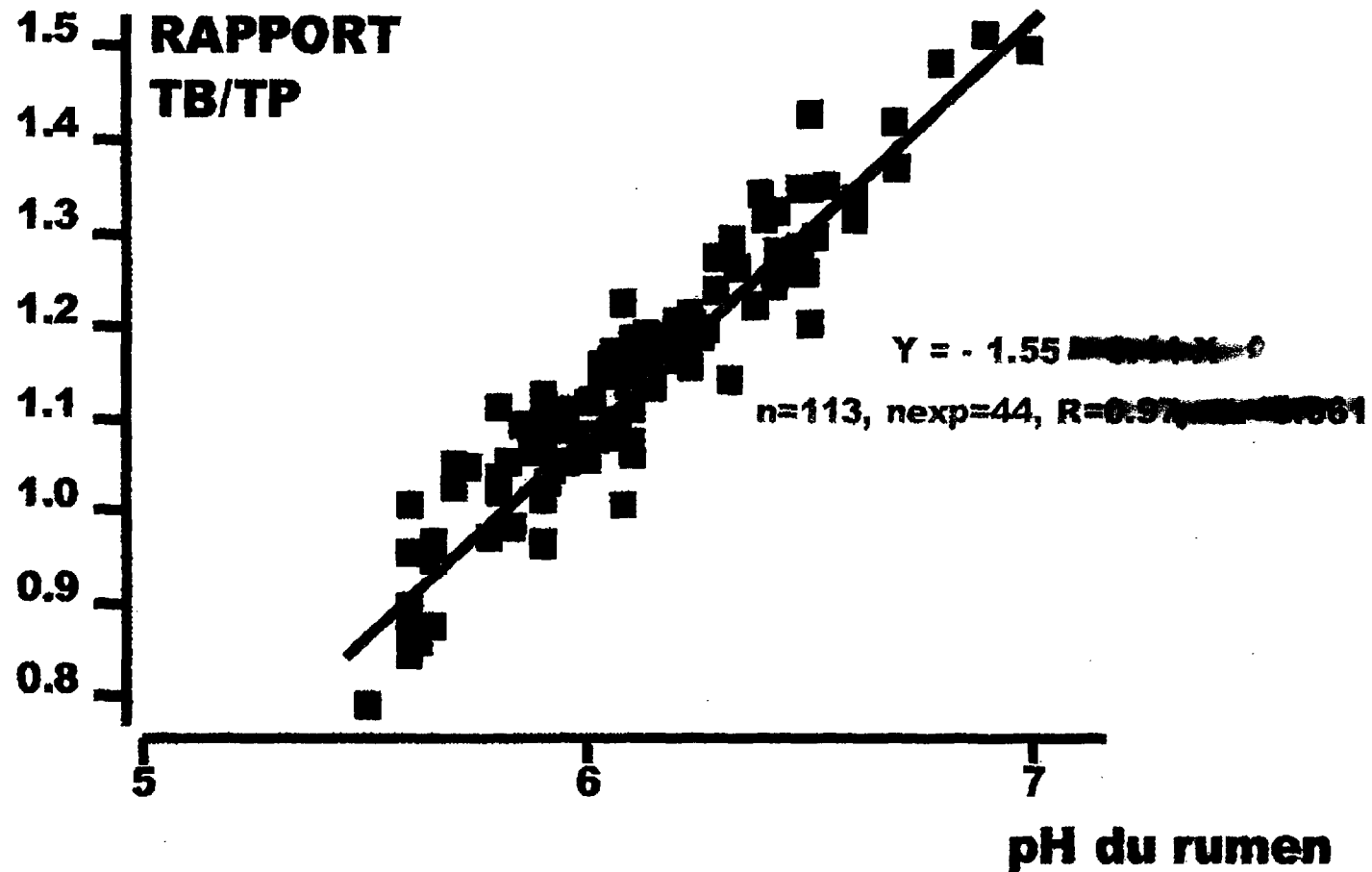
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE (D.SAUVANT & D.MERTENS,np)

FIG. 2

3R1999

# RELATION ENTRE LE RAPPORT TB/TP DU LAIT ET LE pH DU RUMEN

*Page 13*



Synthese d'essais ou le facteur experimental  
etait le % de concentré (D.Sauvant & D.Mertens,np)

**FIG. 4**

*30 1999*

tion de la mobilisation des réserves en début de lactation des bovins, caprins et ovins (Broster et Broster, 1998 ; Dedieu et coll., 1991 ; Agabriel et coll., 1992).

L'existence des composantes dynamiques des réponses amène aussi à s'interroger sur la modélisation de la cohérence entre les organisations hiérarchiques spatiales (cf. le 3.1) et temporelles des systèmes considérés. Jusqu'à présent, l'organisation spatiale a été un objet privilégié, or les phénomènes temporels sont aussi essentiels à considérer car l'activité d'élevage correspond à l'articulation de nombreux phénomènes dynamiques plus ou moins contrôlables et fortement imbriqués (stades physiologiques des fourrages et des animaux, rythmes de la reproduction, influences climatiques, variations des prix, des produits...). Ces aspects ont déjà été considérés et discutés dans le cadre de la réponse du système de production aux pratiques plus tactiques (court terme) ou stratégiques (long terme) de l'éleveur (Gibon et al, 1988 ; Attonaty et Chatelin, 1990 ; Landais 1996).

### 3.4. LA STOCHASTICITÉ DES RÉPONSES

Les réponses animales mises à jour et modélisées sont généralement utilisées sous forme déterministe et n'intègrent donc pas le fait que les paramètres considérés représentent des variables aléatoires. Les résultats des simulations peuvent être entachés d'une incertitude et il importe de chercher à mieux la connaître. En effet l'émergence du souci légitime d'intégration du **risque associé à tout choix technique** nécessite le développement de modèles qui soient capables d'indiquer des "prédictions probabilisées". Ces aspects n'ont pas encore été beaucoup modélisés dans les productions d'herbivores, des chantiers importants devraient leur être consacrés.

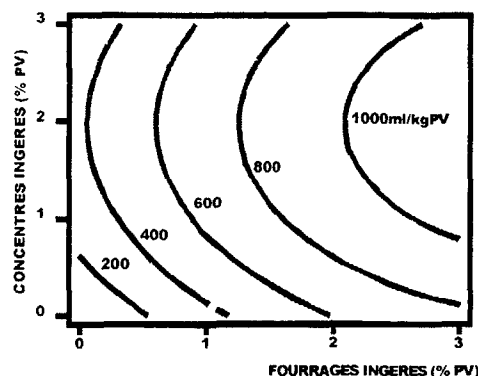
### 3.5. LES TRANSFERTS DE LOIS DE RÉPONSES ENTRE ESPÈCES

Les efforts de recherches des dernières décennies, et de ce fait la quantité et la qualité des résultats disponibles, ont été très inégaux entre les différentes espèces et types de ruminants. Sachant que ces animaux se distinguent par un dénominateur commun physiologique fort, il importe de chercher.

- à savoir dans quelle mesure un modèle établi pour une espèce de ruminant est "portable" vers une autre espèce considérée dans un stade physiologique comparable, en intégrant des effets d'échelle et quelques paramètres de transfert. De telles hypothèses ont été faites pour transférer le système des UEL des bovins aux caprins (Morand-Fehr et Sauvant, 1988). Dans un domaine comparable, le tableau 1 présente les valeurs des paramètres d'échelle et de transfert qui permettent de calibrer un modèle mécaniste de production et nutrition du ruminant laitier (Sauvant, 1996) à des chèvres ou à des vaches.
- à élaborer des modèles s'appuyant sur les lois biologiques de base, reconnues comme universelles et qui puissent donc englober les différentes espèces. Ainsi la **figure 5** indique la production de méthane d'un ruminant en fonction des quanti-

tés de fourrages et de concentrés ingérés. Cette relation a été extraite d'une base comprenant 265, 221, 377 et 41 résultats sur bovins en croissance, en lactation, ovins et chèvres laitières respectivement. Le fait de rapporter les données au poids vif et non au poids métabolique permet de faire disparaître l'influence de l'espèce.

**Figure 5**  
Influence de l'ingestion de fourrages et de concentrés sur la production de méthane par le ruminant



Synth. lit (D. Sauvart & S. Giger-Reverdin, 1998)

### 3.6. LE COÛT ET LA PERTINENCE DES CRITÈRES EXPLICATIFS ET DE RÉPONSES

Un modèle de LRM doit pouvoir être utilisé avec un **faible coût de mise en œuvre**, il doit donc s'appuyer sur des caractères simples et appréciables dans les conditions de l'élevage. Ce principe peut être antinomique avec le souhait de précision maximale des LRM. D'autre part, il importe de s'appuyer sur des paramètres prédictifs bien définis et non contradictoires. Sinon il convient de dégager les raisons des apparentes contradictions entre les effets des déterminants de réponses considérés a priori comme analogues, ainsi :

- des infusions de glucose dans l'intestin grêle abaissent systématiquement le TB du lait (Hurtaud et coll., 1998)
- un apport d'amidon lentement digestible dans le régime est réputé entraîner une absorption accrue de glucose dans l'intestin grêle mais il accroît significativement le TB du lait (Sauvant, 1997).

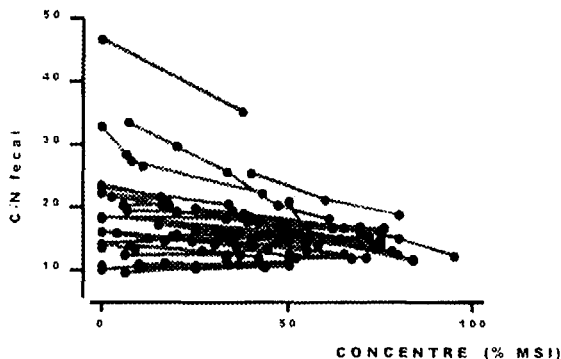
D'autre part, la **redondance entre les critères explicatifs** des réponses doit être considérée. Ainsi, chez les ruminants, un faisceau de critères corrélés traduitent les variations de la fibrosité des régimes qui induit différentes réponses (teneurs en UF, en UE, en paroi végétale, taille des particules, indice de mastication...). Dans une telle situation, il importe de chercher à sélectionner le, ou les, critères présentant le meilleur rapport pertinence/coût.

**Tableau 1**  
Paramètres de transfert entre des modèles chèvre et vache en lactation

	VACHE	CHEVRE
FLUX D'ENTREE ET DE SORTIE	x 1	x 1/10
TAILLE DES COMPARTIMENTS « PHYSIQUES »	x 1	x 1/10
ETATS INITIAUX DES POOLS METABOLIQUES	x 1	x 1/10
TENEUR EN LACTOSE (g/kg)	48	43
TAUX DE PRELEVEMENT MAMMAIRES	x 1	x 0.7

Enfin, les réponses mesurées ne sont pas toujours adaptées à l'évolution des besoins des utilisateurs. Il s'avère alors nécessaire de rechercher de nouveaux critères et d'en prévoir les réponses. Par exemple, pour l'environnement, le rapport C/N des déjections fécales est un paramètre important. Or peu de références sont disponibles sur ce critère (Van Bruchem et al., 1999) malgré les milliers de mesures d'analyses fécales déjà effectuées ! Dans de tels contextes, les bases de données quantitatives évoquées au 2.2 peuvent permettre de fournir rapidement des éléments de réponses (figure 6).

Figure 6  
Influence de la proportion d'aliment concentré sur le rapport C/N des bouses chez les bovins



Synthèse bibliographique (D. Sauvant & D. Mertens, 1998)

#### 4. SYSTEMES D'UNITES D'ALIMENTATION ET LOIS DE REPONSES MULTIPLES

Les systèmes d'unités d'alimentation, créés et améliorés depuis plus d'un siècle, ont été essentiellement conçus pour permettre d'exprimer le **potentiel de production** des animaux. Ils se sont plutôt appuyés sur l'existence de relations métaboliques supposées linéaires entre les besoins et les apports (= rendements de transformation constants). Il convient donc de s'interroger, d'une part sur leur capacité à aider à raisonner en terme de LRM et, d'autre part, sur leur possibilité à évoluer de façon à se placer au mieux dans cette perspective.

L'approche loi de réponse multiple amène en particulier à considérer des flux produits (lipides, protéines, urée...) qui sont l'aboutissement de processus métaboliques bien définis. Ce fait invite à "remonter" au sein des métabolismes correspondants et amène logiquement à envisager à des systèmes dont les unités correspondent à des **flux de nutriments absorbés** : acides aminés (acides gras volatils, glucose, acides gras longs, NH<sub>3</sub>...). Dans un tel contexte, les unités d'alimentation les plus "agrégées" présentent a priori des limites. C'est le cas des **unités d'énergie** qui, d'une part, regroupent des **nutriments**, dont les devenir métaboliques et les effets physiologiques devraient être considérés séparément et, d'autre part, agrègent des fonctions physiologiques différentes (lactation + engraissement). Les systèmes d'unités d'alimentation azotée (PDI) sont par contre mieux adaptés que les unités d'énergie aux réponses car ils s'appuient sur des flux de nutriments physiologiquement plus homogènes et se comportant métaboliquement comme des "flux tendus" : les acides aminés d'une part, NH<sub>3</sub> et l'urée d'autre part. C'est ainsi que des réponses de la production laitière et des rejets azotés aux apports de PDI ont pu être proposés (Vérité, 1983; Vérité et Delaby, 1998; Giger-Reverdin et coll., 1998). Les flux de PDI se sont cependant avérés être trop agrégés pour expliquer et prédire précisément les sécrétions protéiques du lait et il a été nécessaire de les "segmenter" en fonction de leur proportion en lysine et méthionine (Rulquin et al., 1998).

Une autre question soulevée par l'approche LRM concerne la notion de **besoin d'entretien** qui perd de la signification. Cette remise en cause permettra sans doute de reconnaître le fait que le besoin d'entretien fait partie intégrante des LRM. Ainsi, le besoin d'entretien en P est proportionnel à l'apport alimentaire de cet élément (Gueguen et al, 1987), de même le ruminant peu productif est capable de survivre à des niveaux azotés alimentaires bien inférieurs aux besoins d'entretien classiques.

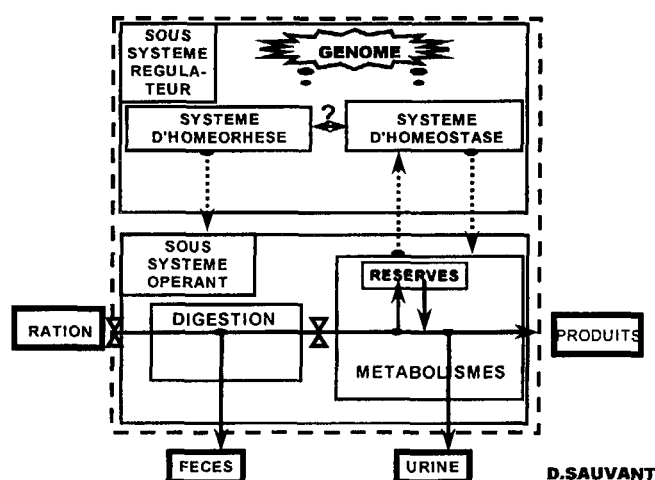
## 5. L'INTERET DE LA MODELISATION SYSTEMIQUE

### 5.1. L'APPROCHE SYSTEMIQUE

#### 5.1.1. De l'organisme animal

L'explication et la prédiction des réponses animales aux régimes nécessitent de mieux comprendre et intégrer les **forces régulatrices internes** des flux de nutriments. A ce propos, on considère qu'un organisme animal constitue un système complexe piloté conformément au **projet téléonomique** de J. Monod (1970) qui suppose que tout être vivant a inscrit dans son génome un double projet, celui de la **pérennité de son espèce** et, d'autre part, celui d'**assurer sa propre survie**. Pour assurer ces deux finalités, les êtres vivants possèdent deux systèmes régulateurs majeurs, respectivement ceux d'**homéorhèse**, ou de **téléophorèse** selon Y. Chilliard (1986) et d'**homéostasie** (figure 7) qui assurent un double contrôle sur la plupart des flux métaboliques et constituent la base de l'organisation spatio-temporelle des métabolismes (Sauvant, 1992, 1994).

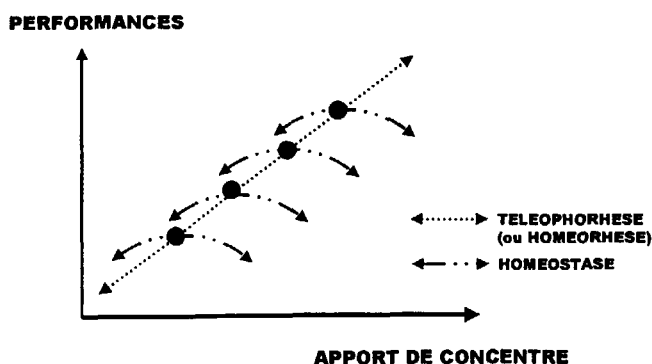
Figure 7  
L'approche systémique de la nutrition



Les fonctions de reproduction (s.l., c'est à dire incluant la croissance comme d'un délai de maturation sexuelle) qui sous-tendent les grandes fonctions zootechniques, relèvent de régulations téléophorétiques. Celles ci contrôlent les flux métaboliques essentiellement à travers des actions de **type "pull"**, par application des programmes géniques et sans processus de rétroaction (= asservissement). En contraste, les régulations d'homéostasie agissent **par rétroaction** pour **s'adapter à un changement de situation** "évalué" par un **système capteur** (changement de température, arrivée d'un congénère dominant, vague d'entrée de nutriments dans l'organisme...). Cette information captée entraîne, si nécessaire, une réponse adaptative de court terme. Les structures et les modalités des contrôles homéostatiques sont extrêmement diverses selon le nutriment considéré et son degré de signification vitale.

Les facteurs de production gérés par les pratiques de l'éleveur, l'alimentation en particulier, apparaissent comme une troisième grande fonction de contrôle des flux de nutriments, de **type "push"**, qui va interagir avec les deux régulations internes évoquées. Dans ce contexte l'homéostasie joue un rôle de **tampon dynamique** entre ce contrôle exogène et l'asservissement téléophorétique. C'est ce rôle tampon des régulations homéostatiques qui constitue le **principal déterminant des lois de réponse des animaux aux régimes**. Ces aspects plaident pour chercher à modéliser de façon d'abord distincte les effets des régulations de téléophorèse, ce qui correspond à l'**approche classique** évoquée en introduction, à ceux liés aux effets des régimes sur les régulations d'homéostasie (figure 8). Ce type de distinction a été proposé dans le modèle de régulation de l'ingestion du mouton développé par Sauvant et coll. (1996).

**Figure 8**  
Décomposition des réponses zootechniques  
en fonction des régulations métaboliques



Les relations entre des paramètres zootechniques courants peuvent prendre des allures très différentes selon que la force motrice dominante est l'homéorhèse ou l'association homéostase + régime alimentaire. Cet aspect a déjà été évoqué en partie 3.2. à propos des relations entre les TB et TP du lait. On le retrouve dans le cas des bovins, et sans doute des ovins, en croissance chez lesquels un GMQ plus important, dû à un meilleur potentiel génétique, est moins exigeant en énergie alors que l'inverse se produit pour un animal donné chez lequel un GMQ élevé est obtenu par une alimentation plus abondante (Geay et Micol, 1988).

### 5.1.2. Du système de production

Pour différentes raisons le système de production tend à devenir le nouveau "centre de gravité" de la zootechnie (Landais et Bonnemaire, 1996), il est donc logique de s'interroger sur la place que peut prendre les LRM aux pratiques alimentaires. L'approche systémique des systèmes agraires a été pratiquée depuis environ 25 ans, en particulier à l'INRA-SAD (Landais, Deffontaines, 1990). Conceptuellement, les considérations précédentes sur les régulations relatives à l'organisme animal s'appliquent au niveau des systèmes de production sauf que l'éleveur devient un pilote majeur du système et que les termes d'homéostase et de téléophorhèse sont remplacés par des **considérations tactiques et stratégiques** (durabilité...). Dans ces approches l'animal est au plus considéré comme une "boîte noire", et représente le niveau organisationnel le plus sous-jacent du système considéré. Cependant il convient de souligner que l'animal n'est généralement considéré qu'à travers des **critères trop grossiers** pour traduire les réponses aux régimes telles qu'elles apparaissent à partir des données expérimentales. Ainsi, de nombreuses enquêtes sont régulièrement effectuées dans les différentes productions d'herbivores pour mettre à jour les combinaisons des facteurs de production qui permettent d'améliorer le revenu de l'éleveur (Grasset et coll., 1997). Dans ces études, les paramètres techniques considérés sont effectivement caricaturaux par rapport à l'état de la connaissance expérimentale sur les LRM. Cet aspect est très important car il **révèle l'existence d'un fossé** entre les informations disponibles aux niveaux organisationnels "animal" et "système de production". **Un des enjeux les plus importants** des prochaines années sera de réduire ce fossé. Une voie consiste à améliorer la "mesurabilité" des LRM des animaux, à l'aide d'indices simples, utilisables par l'éleveur au niveau du système de production. Il est également souhaitable de pouvoir disposer de systèmes d'observation en "vraie grandeur" capables de traduire et étudier l'impact d'une pratique alimentaire donnée (Brocard, 1999). Cependant, ces dispositifs sont rares et coûteux à entretenir. La réduction du fossé doit également être un objectif prioritaire de la **recherche expérimentale**. C'est dans cette optique que doivent en particulier s'inscrire les recherches sur la **conduite du pâturage et des parcelles**.

### 5.2. L'APPROCHE MODÉLISTRICE

L'intégration simultanée de flux d'éléments de nature et de signification physiologique et/ou agronomique différentes ne peut se faire sans l'utilisation de méthodes mathématiques appropriées. Dans ce domaine, deux principaux types de modèles mathématiques semblent pouvoir être appliqués avec intérêt.

Les **modèles empiriques** permettent d'expliquer et de prédire des réponses d'un système considéré comme une boîte noire, c'est à dire sans prendre en compte des structures ou des phénomènes sous-jacents. L'application des modèles statistiques linéaires à des bases de données (cf. partie 2.2) correspond à de la modélisation empirique. L'approche systémique du système de production évoqué au 5.1.2. donne de la pertinence à une modélisation empirique des réponses des animaux qui soit la plus documentée et flexible possible pour pouvoir s'appliquer au mieux à la diversité des contextes pratiques de la production. Ces modèles présentent l'intérêt d'être associés à un degré d'incertitude (écart type résiduel...), aspect évoqué au 3.4.

Les **modèles mécanistes** dynamiques et déterministes consistent à considérer l'organisme, ou le système de production, comme un système à compartiments. A chaque compartiment est associée une équation différentielle dynamique qui traduit les variations de quantités de substance ( $dQ/dt$ ) présente dans le compartiment en fonction des flux entrants ( $F_e$ ) et sortants ( $F_s$ ). Ce sont sur ces flux que s'appliquent les **régulations** (ou les décisions), qu'elles soient d'origines internes ou externes (cf. le 5.1.).

Les modèles mécanistes présentent a priori différents avantages :

- ils traduisent les structures et la fonctionnalité, exprimée dans un **diagramme conventionnel** et facilement compréhensible, du système.
- ils sont capables de prendre en compte des phénomènes se déroulant sur plusieurs niveaux organisationnels ainsi que les relations entre ces niveaux, ils peuvent ainsi justifier ou donner du sens aux recherches considérées comme "plus pointues"
- ils intègrent naturellement des composantes dynamiques des phénomènes
- ils tirent un plein profit de l'accroissement rapide de la puissance des ordinateurs
- ils peuvent tenir compte simultanément de données mesurées et de principes pertinents, pour traduire certaines régulations par exemple.

Ces modèles mécanistes présentent cependant un certain nombre de limites. Ils sont souvent lourds à construire et lorsque les lois de transfert entre les éléments ne sont pas simples (non linéaires), ils présentent à la simulation des comportements souvent imprévisibles et inexplicables (chaos...). En outre, le réflexe cartésien d'intégration de phénomènes situés à des niveaux sous-jacents explicatifs risque de "charger" inutilement ces modèles et d'handicaper leur opérationnalité.

D'autres méthodes de modélisation peuvent être utilisées cependant, compte tenu des objectifs pratiques et méthodologiques et de la disponibilité des logiciels, les deux types de modèles évoqués nous semblent être les plus porteurs pour l'avenir du thème considéré dans ce rapport.

### 6. L'INTEGRATION DES PARAMETRES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES

Les zootechniciens ont depuis longtemps cherché à calculer des critères ou **ratios techniques simples** qui présentent une signification économique. L'exemple classique concerne l'**indice de consommation** (kg d'aliment ingéré / kg produit). Malgré son imprécision, ce critère est, pour un type homogène de production et de régime alimentaire, assez représentatif des variations du coût de production ou de la marge de transformation. A un niveau plus intégré de tels critères sont aussi recherchés, c'est par exemple le cas de la "production de lait sans concentré par ha de SFP". Le développement du concept

de LRM amène à rechercher des critères plus représentatifs de l'ensemble des réponses considérées.

Les modèles de LRM correspondent en fait aux "modèles biotechniques" tels qu'ils ont été explicités et discutés notamment par Landais et Deffontaine (1990). C'est à partir du modèle biotechnique que se fait "l'interfaçage" entre les univers technique et économique. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir exprimer les différents flux techniques d'entrée et de sortie à l'aide d'une unité commune, de nature monétaire, pour calculer une **marge brute de transformation**. Lorsque que telles démarches sont appliquées, il s'avère souvent que l'optimum de la marge ne correspond pas à la maximisation du paramètre zootechnique considéré comme majeur (GMQ, production de lait). Cependant une telle démarche soulève des problèmes et appelle des critiques. Ainsi, il n'est pas possible de disposer de valeurs économiques indiscutables pour des intrants alimentaires tels que les fourrages. D'autre part, certains flux produits (rejets d'N, de P ou de méthane...) ne possèdent pas de dimension économique consensuelle. En outre, comment intégrer dans l'état actuel de la connaissance, certains facteurs de risque (pathologie...) ou certains critères de bien-être qui ne sont actuellement évalués qu'à travers des indicateurs indirects et sans doute peu précis ?

La connaissance de la valeur économique des flux est très utile pour définir un **niveau de précision** à rechercher pour les différents paramètres techniques pris en compte. Il est logique de penser que **l'exigence de précision** est d'autant plus importante que le paramètre considéré détermine le résultat économique du système considéré et cette problématique reste trop négligée, lorsqu'on cherche à hiérarchiser la signification pratique des données techniques.

Il convient de signaler que la **programmation linéaire** a été utilisée depuis des décennies avec des objectifs d'intégration de données techniques et économiques. Cette méthode a été principalement appliquée au niveau du système de production. Son application au "maillon animal" présente a priori de l'intérêt, en particulier parce que **l'analyse duale** des facteurs explicatifs des réponses peut apporter. Cependant la "rigidité" de cette méthode ne paraît pas être pleinement adaptée aux exigences posées par l'objectif d'utilisation des LRM des animaux à leur régime (non linéarité, interactions, intégration d'aspects dynamiques...), il conviendrait donc de chercher à l'adapter à ce contexte.

## CONCLUSIONS

La compréhension et la prévision des réponses des animaux aux régimes alimentaires constitue le nouveau paradigme de la nutrition animale. Cette démarche est indispensable pour apporter, grâce à des modèles, à l'éleveur et à ses partenaires, des outils de gestion précis et adaptés au contexte actuel et futur de l'élevage. Ces modèles sont moins avancés chez les ruminants que chez les monogastriques en raison du poids du milieu environnant et du système fourrager et de la complexification qu'il entraîne. Il semble que, dans l'état actuel de la connaissance, les deux principales limites au progrès soient, d'une part, le manque de modèles de LRM des animaux par rapport à la diversité des pratiques alimentaires des éleveurs et, d'autre part, le fossé qui sépare encore les données issues des approches expérimentales de celles obtenues sur le terrain. La réduction de ces limites devrait être considérée comme priori-

taire et devrait justifier de lancer rapidement un ou plusieurs chantiers organisés en vue d'en atténuer les conséquences.

- AFRC, 1998, report n° 11, Techn. com. on responses to nutrients. Ed. CAB
- J. Agabriel, N. Grenet, M. Petit, 1992, *Prod. Anim.*, 5, 355-369.
- C. Agabriel, J.B. Coulon, G. Marty, B. Bonaiti, P. Boniface, 1993, *INRA Prod. Anim.*, 6, 213-223.
- Attonatty J.M., M.H. Chatelin, *Etudes et Recherches du SAD-INRA*, 17, 75-87.
- C. Beranger, A. Gibon, J.C. Flamant, 1998, *Renc. Rech. Ruminants*, 5, 155, 160.
- V. Brocard, J. Kerouaton, D. Lemeur, 1999, Long term effects of a large decrease in the concentrate for dairy cows, *Congres FEZ*, Zurich.
- J. Brosnier, E. Chia, E. Marshall, M. Petit, 1997, *Gestion de l'exploitation agricole familiale*, 215 pp., Ed. CNERTA.
- W.H. Broster, V.J. Broster, 1998, *J. Dairy Res.* 65, 155-173.
- W.G. Cochran, G.M. Cox, 1968, *Experimental design*. Ed. Wiley
- J. Colegou, 1960, Les références concernant le rationnement des animaux. *Econ. Rurale*.
- B. Dedieu, A. Gibon, M. Roux, 1991, *Rev. SAD-INRA* n° 22, 48 p
- C. Demarquilly, J. Andrieu, D. Sauvant, J.P. Dulphy, 1978, Chap. 16, in *L'alimentation des ruminants*, Ed INRA.
- J. Dillon, 1968, *The analysis of response in crop and livestock production*, Ed. Pergamon. Press.
- A. Gibon, C. Soulas, J.P. Thau, 1988, *Rev. SAD-INRA*, 11, 35-47.
- Y. Geay, D. Micol, 1988, in "Alimentation des bovins, ovins et caprins", ed. INRA
- S. Giger-Reverdin, D. Sauvant, 1998, *Renc. Rech. Ruminants*, 5, 231.
- L. Gueguen, M. Durand, F. Meschy, 1987, *Bull. Tech. CRZV-Theix*, 70, 105-112
- M. Grasset et coll., 1997, *Renc. Rech. Ruminants*, 4, 9-4.
- C. Hurtaud, H. Rulquin, R. Verite, 1998, *J. Dairy Sci.*, 81, 3239-3247.
- R. Jarrige, 1978, Introduction in "L'alimentation des ruminants", ed. INRA
- R. Jarrige, 1988, Préface in "Alimentation des bovins, ovins et caprins", ed. INRA.
- M. Journet, 1983, IVth Int. Symp. Prot. Met. and Nut., ed. INRA
- E. Landais, J.P. Deffontaine, 1990, *Modélisation systémique et systèmes agraires*, ed. INRA
- E. Landais, J. Bonnemaire, 1999, *Courrier de l'Env. INRA*, 27, 23-43.
- O. Martin, D. Sauvant, C. Lopez, P. Brunswig, 1998, *Renc. Rech. Ruminants*, 5, 259
- J. Monod, 1970, *Le hasard et la nécessité*, Ed. Seuil.
- I. Piot-Lepetit, 1997, *Renc. Rech. Ruminants*, 4,
- C. Roguet, P. Faverdin, 1999, *Renc. Rech. Ruminants*, 6, ce volume.
- H. Rulquin, J. Guinard, R. Verite, 1998, *Liv. Prod. Sci.*, 53, 1-13.
- D. Sauvant, 1992, *Rep. Nut. Dev.*, 32, 217-230.
- D. Sauvant, 1994, *Liv. Prod. Sci.*, 39, 105-115
- D. Sauvant et D. Mertens, 1998, *Renc. Rech. Ruminants*, 4, 99-102.
- D. Sauvant, 1997, *Prod. Anim.*, 10, 287-300.
- D. Sauvant, F. Meschy, D. Mertens, 1999, *Prod. Anim.*, 12, 49-60.
- P. Schmidely, 1996, *Ann. Zootech.*, 45, suppl., 193-294
- Van Bruchen, J.W. Schramm, W.A. Martin, W.A. Verstegen, S. Tamminga, 1999, *Symp. FEZ.*, Zurich-Posieux.
- R. Verite, Y. Geay, 1987, *Feed Evaluation and Protein Requirement systems for ruminants*, ed. EUR 10657
- R. Verite, J.L. Peyraud, 1988, The PDI system, ch. 3, in "Ruminant Nutrition", ed. J. Libbey.
- R. Verite, L. Delaby, 1998, *Renc. Rech. Ruminants*, 5, 185-192.
- B. Vissac, 1991, *Les exploitations agricoles et leur environnement*, Ed. INRA
- F. Yates, D.A. Boyd, A. Petit, 1942, *J. Agr. Sci.*, 32, 428.