

L'ELEVEUR, SON ENVIRONNEMENT, SES PRATIQUES ET LA SANTE DE SON TROUPEAU

Approche écopathologique des troubles de santé en élevage bovin laitier *

B. Faye ^[1]

RESUME : L'écopathologie constitue une approche systémique de la pathologie d'élevage. Formellement relevant de la discipline épidémiologique, elle privilégie l'étude des relations entre les éléments constitutifs d'un système d'élevage : l'éleveur dont les décisions se matérialisent sous la forme de pratiques, les ressources qui dépendent partiellement ou non de l'environnement (conditions de production), le troupeau déterminé par des caractéristiques collectives ou individuelles. L'objectif principal de la recherche en écopathologie est donc de mettre en évidence les facteurs de risque de la pathologie d'élevage, généralement d'étiologie multifactorielle, dans le contexte des systèmes de production réels.

En toute logique, un tel objectif implique la collecte, dans des situations d'élevage non-expérimentales, d'un nombre souvent impressionnant d'informations au cours "d'enquêtes écopathologiques". Les outils de la recherche en écopathologie gravitent en conséquence autour de l'informatique (organisation du système d'informations sous forme de base de données) et de la statistique (traitement de l'information par des méthodes d'analyse de données).

Les résultats permettent d'explicitier la pathologie dans les modèles de fonctionnement des systèmes d'élevage et de proposer un modèle écopathologique. La démarche de modélisation représente d'ailleurs une voie privilégiée pour l'avenir des programmes de recherche en écopathologie. Le référentiel que représentent les bases de données disponibles peut aussi servir à enrichir des bases de connaissances (intelligence artificielle, systèmes-experts). En tout état de cause, le retour sur le terrain est indispensable tant pour valider les modèles que pour confronter les connaissances acquises au mouvement du réel. Sur le plan de la pratique vétérinaire, la démarche écopathologique contribue à transformer le "médecin des animaux" en "ingénieur de la santé".

ABSTRACT : Ecopathology represents a systemic approach of farming pathology. Formally linked to epidemiology, it focuses on the study of relationships between the different components of a farming system : the farmer whose decisions become practices, the resources, more or less linked to environment (production conditions), the herd with its collective and individual characteristics. The main aim of ecopathology risk factors, usually of a multifactorial etiology, within the context of actual production systems.

Logically, such an aim means recording, in non-experimental farming situations, a very impressive number of data during ecopathological surveys. The tools of epidemiological research are then coming from computer science (building information systems like data bases), and from statistics (data processing with data analysis methods).

The results lead to the explanation of pathology within farming systems running models and to the proposition of an ecopathological model. The modellisation process represents one of the best way for futur research programmes in ecopathology. The system of reference represented by present data bases may also help to expand knowledges bases (artificial intelligence, expert-systems). However, a feed back on the field is essential to validate the models, as well as to compare new knowledge to reality. Thinking of veterinary practice, the ecopathology move proceeds at the transformation of the animal doctor into an health engineer.



* Thèse d'Université soutenue publiquement à Paris XII-Val de Marne, le 17 octobre 1995

[1] Anciennement : Laboratoire d'écopathologie INRA Theix, 63122 St Genes Champanelle ; actuellement : CIRAD, Avenue du Val de Montferrand, B.P. 5035, 34032 Montpellier, France

I - INTRODUCTION

Depuis l'avancée fondamentale pour la médecine qu'ont représenté les découvertes de Pasteur, la recherche vétérinaire s'est essentiellement appliquée à développer une approche étiologiste répondant à un schéma simple (que nous pourrions qualifier de "monofactoriel" ou de "linéaire") : un agent pathogène -> une maladie ; avec, pour corollaire, une démarche thérapeutique tout aussi linéaire : destruction de l'agent pathogène (anti-infectieux ou anti-parasitaire) -> disparition de la maladie. L'immunité, tant dans la relation étiologique (facteur de la variabilité de la résistance de l'organisme à l'agression pathogène, s'exprimant par un gradient dans la réponse clinique) que dans la relation thérapeutique (vaccination, sérothérapie) peut jouer un rôle intermédiaire dans ce schéma. Mais le caractère linéaire de la relation reste prééminent.

La maîtrise croissante - mais jamais définitive - de cette pathologie monofactorielle a permis une amélioration parfois spectaculaire de la situation sanitaire du cheptel : en France, par exemple, et en se limitant à l'espèce bovine qui est l'objet de nos travaux, éradication de la **peste bovine** (l'importance de cette maladie a motivé la fondation de la première école vétérinaire à Lyon en 1762) et de la **péripleurmonie contagieuse bovine** depuis plus d'un siècle -à l'exception toutefois de quelques foyers épisodiques à la frontière franco-espagnole [Delclos, 1984 ; Martel et al., 1991], absence de **fièvre aphteuse** depuis une décennie ce qui a conduit à un changement de prophylaxie [Moutou, 1990], diminution constante de la **tuberculose bovine** [Bénet, 1994], meilleur contrôle de la **brucellose bovine** [Garin-Bastuji et al., 1993]. Cette amélioration progressive concerne également des maladies d'importance commerciale telles que la **leucose bovine enzootique** dont la forme clinique a pratiquement disparu [Dufour et al., 1993], ou des zoonoses majeures comme la **rage**, marquée

par "*une dynamique rétrograde*" [Aubert, 1993 ; Aubert et al., 1994].

Simultanément, et particulièrement depuis la fin de la seconde guerre mondiale, les systèmes de production laitiers ont subi de profondes mutations se traduisant par "*une quête inlassable d'intensification*" [Cordonnier, 1986]. Cette intensification s'est matérialisée par un accroissement spectaculaire de la quantité de lait produit aboutissant à "*la montée inexorable du fleuve blanc*" [Jarrige et Tirel, 1983] du fait de l'accroissement continu du potentiel génétique et de l'intensification des pratiques alimentaires [Jarrige, 1987]. Sur le plan sanitaire, elle s'est traduite par l'émergence d'une pathologie qui, sans être vraiment nouvelle (mammites, pathologies génitales, affections de l'appareil locomoteur, troubles métaboliques, infécondité,...), a pris une importance particulière du fait de son impact économique sur les coûts de production. A la prédominance des maladies infectieuses à caractère épizootique (fièvre aphteuse) ou enzootique (tuberculose) qui transcendent les systèmes de production, s'est peu à peu substituée celle d'une "*pathologie du quotidien*" [Faye et al., 1994b] d'étiologie multifactorielle et à caractère enzootique. Si les premières relevaient et relèvent encore de plans de lutte nationaux ou départementaux laissant peu de latitude à l'action individuelle de l'éleveur, les secondes s'inscrivent dans un plan de lutte intra-exploitation. L'adhésion du chef d'exploitation au programme sanitaire, nécessaire et suffisante dans le premier cas, doit se compléter dans le second cas d'une appropriation, conférant à l'éleveur un rôle d'acteur central. Les termes de l'approche écopathologique sont ainsi posés : l'éleveur, ses pratiques, les contraintes du milieu et du système d'élevage dans lequel il opère, le statut sanitaire de son troupeau représentent les points essentiels sur lesquels se sont centrés les travaux décrits dans le présent document.

II - SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

L'écopathologie a parfois des difficultés à s'imposer comme démarche scientifique. Il subsiste, en effet, des "*réticences prévisibles des chercheurs attachés à la démarche analytique et explicative classique*" [Landais, 1991]. De fait, l'écopathologie peut être amenée à renvoyer aux autres disciplines médicales (immunologie, physiopathologie...) de "*difficiles questions relatives à l'élucidation des mécanismes responsables des associations mises en évidence entre facteurs de risque et troubles pathologiques*" [Landais, 1991]. Cela tient aussi peut-être à ce qu'elle relève du premier degré de la connaissance, celui de l'**observation**. "*Incapable, par essence, d'établir des relations de causalité entre facteurs de risque potentiels et incidence des pathologies analysées, puisque science d'observation et non d'expérimentation*", l'épidémiologie ne mérite peut-être pas vraiment "*le beau nom de science*" s'interroge Lazar [1994].

Poussant la provocation encore plus loin, il ajoute : "*Voilà un trouble épistémologique qui (...) a de quoi satisfaire tous ceux qui (...) ne parviennent pas à se défaire de l'idée que notre discipline devrait, modestement, se contenter d'un statut de domaine d'appoint de la "vraie" science, celle qui permet d'affirmer de beaux faits, bien clairs et nets, comme le font depuis plus d'un siècle les champs disciplinaires qui se sont développés -notamment en biologie- sur le modèle paradigmatique de la physique expérimentale*". Pourtant l'observation, "*premier outil de la recherche en écopathologie*", [Bamouin, 1992] est assurément digne d'intérêt quand il s'agit d'astronomie, ou pour rester dans le domaine biologique, de génomique. A ce titre, la "*recherche observationnelle*" [Lazar, 1994] n'a pas à être considérée comme une sous-recherche.

L'acceptation de la démarche écopathologique demeure également problématique pour les épidémiologistes attachés aux aspects purement normatifs de la discipline. Ainsi, Bénét *et al.* [1994], bien que reconnaissant le respect par l'écopathologie du "*principe fondamental du cycle induction-déduction, (...) une des bases essentielles du raisonnement scientifique*", affirment que les enquêtes écopathologiques "*demeurent dans un domaine résolument pragmatique, et qu'à défaut de pouvoir respecter les critères de qualité nécessaires, elles ne peuvent pas être considérées comme des études de méthodologie explicative au sens strict*". Le débat épistémologique sur le rapport entre ce qui relève de l'explication et ce qui dépend de la décision reste pourtant très actuel comme en témoignent régulièrement les questionnements sur la causalité, la contingence ou l'observation [Testart, 1991]. Si les discussions sur ce sujet sont encore âpres chez les épidémiologistes, elles renvoient cependant à une vieille question philosophique formulée entre autres par Max Weber, celle de l'opposition entre l'**explication** (*Erklärung*) qui consiste à réduire les phénomènes particuliers à des lois générales, et la **compréhension** (*Verstehung*) qui suppose la prise en considération des intentions des acteurs et relève donc d'une interprétation.

En conformité avec le principe décrit par Claude Bernard [1868] et résumé en sa fameuse formule "*il faut décomposer l'organisme comme on démonte une machine pour en reconnaître les rouages*", la biologie expérimentale s'est attachée à partir du complexe pour aller vers le plus simple afin de *démonter* les mécanismes intimes de la vie. De ce point de vue, de remarquables progrès dans la connaissance ont pu voir le jour. En écopathologie, le choix épistémologique est autre comme nous l'avons amplement souligné. Les travaux entrepris au cours de mon cheminement scientifique personnel se sont progressivement combinés pour éclairer la place du sanitaire dans le concept de système d'élevage. Les publications retenues dans le présent travail permettent de recomposer cette démarche dans le jeu de la complexité en 6 étapes d'importance inégale.

A. SIX ETAPES POUR APPROCHER LA COMPLEXITE DES RELATIONS SANTE-SYSTEME D'ELEVAGE

La première étape a consisté à formaliser un **indicateur de l'hygiène** [Faye et Bamouin, 1985] d'une exploitation, facilement mesurable. Un tel outil entre dans le cadre des liaisons établies entre le "*modèle essentiellement biotechnique*" d'élaboration des performances sanitaires et le "*modèle cybernétique d'élaboration des décisions*" [Landais, 1987] relatives à la gestion sanitaire du troupeau. Un indicateur permet de tester l'état de fonctionnement d'un système donné et contribue donc aux "*flux d'informations qui remontent de la machine au pilote*" [Landais, 1987]. L'état de propreté d'un animal ou d'un troupeau représente un indicateur du fonctionnement sur le plan de l'hygiène pour l'éleveur, et un témoin de l'efficacité des pratiques dans ce

domaine pour l'épidémiologiste. La notion "d'hygiène" étant une notion-clé pour tout ce qui touche à la pathologie d'étiologie infectieuse, on notera la pertinence d'un tel indicateur.

L'étape suivante relève de l'épidémiologie descriptive classique et s'est focalisée sur l'étude des facteurs de variation spatio-temporelle des principales maladies d'élevage [Faye et Faye, 1986 ; Faye *et al.*, 1986c]. En écopathologie, **l'espace pertinent est l'exploitation** où le troupeau subit l'ensemble des contraintes propres à l'environnement local (le climat et la géographie qui déterminent en partie le type et la qualité des ressources, les conditions de logement et d'accès à ces ressources) et des effets spécifiques liés aux choix de l'éleveur en tant que "*décideur et en tant qu'acteur*" intervenant sur son cheptel [Landais, 1987]. Le premier niveau peut solliciter un espace plus large que l'exploitation : la petite région agricole, le département voire la région. Sur le plan sanitaire, une telle préoccupation débouche sur des analyses évaluant l'effet de facteurs climatiques sur certains états pathologiques [Bamouin *et al.*, 1986] ou sur le rôle des types de stabulation sur la santé des troupeaux [Ekesbo, 1966 ; Phillips et Schofield, 1994]. Mais en tout état de cause, c'est bien le second niveau, celui de l'éleveur avec son projet, qui demeure déterminant dans le domaine qui nous préoccupe. C'est donc l'espace de l'exploitation qui constitue l'unité statistique principale dans les publications présentées ici.

Les choix sont moins unidimensionnels en ce qui concerne le temps, et nous avons préalablement souligné l'**imbrication des cycles** [Faye *et al.*, 1991] qui témoignent de l'évolution des systèmes d'élevage. Gallais [1984] évoque le "*temps rond des saisons*" pour signifier les cycles supposés identiques, et Landais [1987] le complète avec "*le temps long*" qui fait référence à une échelle, non pas cyclique, mais linéaire du temps. La prise en compte de "*l'espace-temps*" qui demeure un souci constant en épidémiologie, lie explicitement l'écopathologie à la complexité : en dépit du fait que l'intérêt se porte en priorité sur "*la pathologie du quotidien*" [Faye *et al.*, 1994b], les maladies sont partie intégrante de "*l'épaisseur historique des systèmes considérés*" [Landais, 1987].

La troisième étape consacre la notion **d'association pathologique** [Faye *et al.*, 1986a et b], ou pour reprendre l'expression de Schwabe [1982], "*la toile d'araignée*" des pathologies d'élevage. Il s'agit là, d'un point-clé, nous semble-t-il, pour aborder la complexité des liens entre les événements sanitaires dans un troupeau. Cependant, l'approche développée jusqu'à présent tant par les épidémiologistes anglo-saxons que par nous-mêmes, reste limitée à la mise en évidence de liens statistiques entre des occurrences observées. Si des méthodes statistiques sophistiquées, telles que l'analyse de piste, permettent de considérer les séquences d'apparition dans le temps, il conviendrait d'envisager la prise en compte de la durée des intervalles entre les épisodes sanitaires dans des modèles qui permettraient ainsi de distinguer les liens de causalité biologique, des événements associés par l'entremise d'une prédisposition à composante génétique ou

environnementale. Autrement dit, il ne s'agirait pas simplement de calculer des associations statistiques entre troubles sanitaires à l'échelle d'une lactation ou de deux lactations successives, mais d'analyser les relations entre ces troubles selon l'ordre d'apparition et l'écart de temps entre ces apparitions en gardant des hypothèses biologiques raisonnables.

Au cours de la quatrième étape, l'intérêt s'est porté sur la recherche des **facteurs de risque** de quelques maladies économiquement préjudiciables (mammites et boiteries) et sur la définition de **systèmes à risque** [Faye et al., 1986d ; Faye et Brochart, 1986 ; Faye et Lescourret, 1989 ; Faye, 1991]. A ce niveau, il incombe de s'interroger sur la notion de "pratiques à risque". C'est la combinaison des facteurs en une unité de temps (typiquement une année civile) plutôt que leur enchaînement qui a prévalu dans les travaux présentés ici, faute de connaissance suffisamment fine de la séquence des pratiques, et du fait aussi de la non prise en compte du facteur "temps" associé aux pratiques, certaines relevant d'actes quotidiens répétés (pratiques de traite par exemple), d'autres d'une décision unique à l'échelle de la carrière de l'animal (pratiques de réforme par exemple). En écopathologie, le relevé des pratiques et des conditions d'élevage dans les analyses, n'a pas pour objectif de définir des "types d'élevage" en vue de formaliser un fonctionnement technico-économique pouvant servir de référentiel, mais plutôt de préciser les modes d'élevage résultant de "la combinaison finalisée d'un mode d'agrégation, d'un mode de conduite, d'un mode d'exploitation" [Landais, 1987] qui, par hypothèse peuvent avoir un lien avec la maladie et, de ce fait, conduisent à un statut sanitaire particulier.

Au cours de l'étape suivante, il a été proposé de tenir compte du **rôle spécifique de la personnalité de l'éleveur** [Faye, 1994 ; Faye, 1995], aspect rarement abordé en épidémiologie [Bigras-Poulin et al., 1985 ; Beaudeau, 1995]. Il faut insister pourtant sur le fait que "les tendances lourdes des systèmes agraires semblent largement déterminées par des critères d'efficacité technique" [Landais, 1987] et qu'en conséquence, l'éleveur est parfois celui qui détermine en dernière instance le statut sanitaire du troupeau. En dehors de toute compétence en matière de sociologie ou de psychologie, nous avons opté pour une approche indirecte de la personnalité de l'exploitant en se basant sur le principe que "l'animal est le reflet de son maître" [Samraus et Unshelm, 1983]. Si la hiérarchie sociale selon laquelle s'organise un troupeau de vaches laitières est en toute vraisemblance indépendante de l'Homme [Albright, 1971], la perception de cette hiérarchie par l'éleveur peut révéler "les caractéristiques psychologiques" de ce dernier, élément qui entre à l'évidence dans la complexité des relations entre les pratiques et la santé du troupeau. Certes, l'éleveur n'est pas assimilable à un "facteur de risque", mais le "style de management" [Beaudeau, 1995] est une donnée à prendre particulièrement en compte pour rendre opérationnels les plans de prévention sanitaire issus des études d'écopathologie [Peretz et al., 1994].

Enfin, dans la dernière étape, nous nous sommes interrogés sur le "temps long" [Landais, 1987]. Il est notable qu'en dehors des recherches sur la génétique des populations dans l'espèce qui nous intéresse ici, il existe peu de travaux qui abordent la problématique de l'élevage (nutrition, reproduction, pathologie) à des échelles de temps supérieures à la lactation ou de deux lactations successives. Le traitement de l'information sanitaire à l'échelle des **carrières animales** et la description de **trajectoires individuelles ou de troupeau** [Faye et al., 1994a ; Faye et al., 1995a] rajoutent sans doute une dimension supplémentaire à la complexité, mais peuvent s'avérer prometteurs pour mieux comprendre les effets cumulatifs ou compensateurs observables dans la durée. C'est tout l'enjeu et l'intérêt du programme LASCAR engagé avec nos collègues zootechniciens et systémiciens [Coulon et al., 1993].

Ces différentes étapes, succinctement décrites ici, s'inscrivent bien dans le "modèle général pour l'étude du fonctionnement des systèmes d'élevage à l'échelle de l'exploitation" proposé par Landais [1994]. Ainsi, l'étude de la répartition des troubles sanitaires dans l'espace et le temps contribue à enrichir les "référentiels divers" à l'origine de l'élaboration des décisions. Les caractéristiques psychologiques de l'éleveur précisées à partir de sa perception du tempérament de ses vaches, permettent d'approcher certains aspects des "normes de comportement" en lien également direct avec l'élaboration des décisions. En fonction des objectifs de l'exploitant, ces décisions conduisent au choix d'un ensemble de **pratiques d'élevage** dont certaines, isolément ou en combinaison, peuvent constituer des facteurs de risque sanitaire. Les pratiques d'élevage visent "l'élaboration de performances" dont les aspects sanitaires représentent un sous-ensemble, à l'échelle d'une unité de temps déterminée (statut sanitaire au cours d'une année civile) ou à l'échelle de la carrière (trajectoire sanitaire). Les performances sanitaires peuvent être appréciées dans leur globalité, ce qui conduit à la notion de "profil sanitaire" et/ou "d'association pathologique".

Ces performances amènent à des **productions** dont la qualité sanitaire représente un des critères d'évaluation. Ces performances dépendent aussi du **milieu environnant et de ses ressources** dont certains paramètres peuvent à leur tour être assimilés à des facteurs de risque sanitaire.

Enfin, productions, performances et environnement sont "perceptibles" à partir "d'indicateurs de fonctionnement" tels que l'indice de propreté ou des paramètres métaboliques sanguins, témoins du statut nutritionnel, et qui influent directement sur la "formation des choix techniques", comme instrument de pilotage par l'éleveur.

Ces remarques ne visent pas uniquement à introduire subrepticement le *sanitaire* dans le modèle général proposé par Landais. Il est notable en effet que les systémiciens ont, tout autant que les zootechniciens analytiques, tendance à s'interroger très secondairement sur la pathologie d'élevage, fut-elle rebaptisée "performance sanitaire".

De fait, le **sanitaire** n'apparaît pas de manière explicite dans les schémas proposés par les systémiciens. Or, les troubles de santé qui nous préoccupent dans la démarche écopathologique sont tout aussi "quotidiens" que la production. Aussi, est-il proposé d'expliciter (au sens de rendre explicite) le sanitaire dans le "modèle général pour l'étude du fonctionnement des systèmes d'élevage". La pathologie multifactorielle est inhérente au système d'élevage. Non seulement elle n'en est pas un élément marginal, mais elle peut être considérée comme un paramètre nécessaire au fonctionnement du système. La pathologie, c'est de la zootechnie loin de l'équilibre.

Un modèle général spécifiquement écopathologique peut dès lors être proposé à partir de ce schéma conceptuel.

B. DU MODELE CONCEPTUEL A L'ANALYSE STATISTIQUE

Les méthodes quantitatives en épidémiologie animale ne se sont vraiment développées que depuis une trentaine d'années. Depuis, les revues spécialisées fourmillent de résultats visant à "quantifier" le risque. Cependant, ce souci légitime n'oblitére pas les limites du raisonnement statistique. En effet, les tests impliquent que les facteurs de risque interviennent aléatoirement sur un ensemble d'individus dans une population donnée, et que les individus sont échantillonnés de façon aléatoire au sein de cette population. Le respect de ces deux principes est nécessaire pour déterminer l'inférence causale dans un modèle complexe et pour extrapoler l'inférence à une population plus large que l'échantillon. Or, comme le signale McDermott [1994], ces deux principes sont régulièrement violés en raison des contraintes pratiques d'échantillonnage. Par ailleurs, il serait péremptoire d'affirmer que le "risque individuel" et que "le taux de risque dans une population" considéré comme un risque moyen, représentent des notions identiques [Zeger, 1991].

En d'autres termes, il faut réaffirmer ici le fait que la démarche épidémiologique en général et écopathologique en particulier, ne saurait se résoudre dans la simple sophistication des méthodes statistiques employées. Ou pour répondre à la question de McDermott [1994], il faut "retourner aux sources". Ce qui implique une phase d'exploration graphique des données et de mise en oeuvre de tests simples, c'est-à-dire redonner aux statistiques descriptives, celles utilisant en particulier les techniques graphiques, leur place première. Greenland [1990] propose de réaliser des *analyses de sensibilité* ("sensitivity analysis") qui consistent à utiliser diverses techniques analytiques sur le même jeu de données afin d'identifier les résultats communs qui en émergent. De ce point de vue, la démarche permise par l'Ecole française de statistique et par des outils informatiques (tels que le logiciel Splus), paraît bien adaptée. "Un avantage important des méthodes descriptives est qu'elles présentent des résultats non sous une forme de valeur de probabilité dogmatique, mais sous forme d'un champ de variation des valeurs

possibles" [McDermott, 1994]. Nous avons d'ailleurs souligné dans l'introduction, la grande variabilité des valeurs "quantifiées" proposées dans le cadre de diverses études, résultats qui interrogent l'épidémiologiste sur leur robustesse.

Il incombe aussi à l'écopathologie de susciter un effort accru pour être à l'écoute des méthodes statistiques utilisées habituellement dans d'autres champs disciplinaires dans lesquels l'objectif n'est pas de quantifier un risque, mais de relever des relations entre des événements ou des structures de natures différentes. C'est le cas par exemple des méthodes multivariées relevant de l'analyse canonique des correspondances (ACPVI, AFCVI, analyses sous contraintes...), développées par les écologues. Ces méthodes peuvent être considérées comme une généralisation de la régression au cas de 2 ensembles de variables, l'un étant explicatif de l'autre. Les variables du tableau à expliquer (en principe exhibant la composition faunistique et floristique quantitative ou qualitative de différents milieux) sont projetées dans l'espace défini par les variables du tableau explicatif (en général décrivant les caractéristiques de ces mêmes milieux), puis une AFC de ces projections est effectuée [Lebreton et al., 1988].

Nous avons récemment utilisé cette méthode pour étudier les relations entre la distribution des différents types d'atteintes de la mamelle à l'échelle des exploitations-années (variables dépendantes) et un certain nombre de pratiques de traite, de prophylaxies sanitaires et de conditions de logement (covariables) [Faye et al., 1995b].

C. DE L'ANALYSE STATISTIQUE A LA MODELISATION

Le modèle, qui peut se définir comme "la représentation simplifiée, résumée et idéalisée de la réalité, basée sur un jeu ordonné de suppositions" [Mertens, 1976], est un outil essentiel pour l'étude des systèmes [Bawden et al., 1984]. En épidémiologie, l'idée d'utiliser des modèles mathématiques pour prédire l'évolution d'une épidémie est ancienne. Hurd et Kaneene [1993] signalent qu'en 1865, l'anglais W.Farr avait proposé une équation du second et du troisième degré pour prédire l'évolution d'une épizootie de peste bovine dans son pays. La modélisation des processus infectieux au sein d'une population déterminée a nourri, depuis, une littérature abondante. Dans ce domaine, King et Soskolne [1988] distinguent les "modèles processuels" qui visent à décrire l'occurrence, la propagation, la transmission et la prévention d'une maladie spécifique ou d'une épidémie, et les "modèles associatifs" qui se focalisent sur l'analyse des interrelations entre la maladie et les facteurs du milieu. En écopathologie, la démarche de modélisation s'inscrit a priori préférentiellement dans ce dernier type. Cependant, il peut être nécessaire dans la construction d'un modèle écopathologique "associatif" d'identifier des sous-modèles "processuels". L'évaluation de l'impact des mammites sur la production laitière à l'échelle d'un troupeau par exemple implique la combinaison d'un modèle "associatif" estimant l'effet des infections mammaires sur la courbe de production

de chaque vache [Lescourret et Coulon, 1994] et d'un modèle "processuel" permettant la prédiction de l'occurrence des mammites [Lescourret et al., 1995].

Chacun de ces types de modèle peut se subdiviser à nouveau en deux catégories : les modèles *déterministes* et les modèles *stochastiques*. Les premiers modèles élaborés en épidémiologie furent déterministes [King et Soskolne, 1988], les éléments d'incertitude dans la perception du système n'étant pas pris en compte. Ainsi, à l'échelle d'une population, l'évolution d'une épizootie peut être **déterminée** par la connaissance du nombre initial d'animaux susceptibles et infectés, des taux d'attaque, de guérison, de naissance et de mortalité. Dans la plupart des cas, en écopathologie, la part d'inexpliqué ou d'inexplicable demeure prépondérante ce qui conduit à proposer des modèles stochastiques basés sur les lois de la probabilité. De tels modèles sont amplement utilisés dans l'étude de *"la dynamique du complexe santé-production en élevage"* [Sorensen et Enevoldsen, 1992].

Dans leur revue, King et Soskolne [1988] suggèrent une distinction complémentaire entre les modèles *"structuraux"* et *"fonctionnels"*. Le modèle structural vise à représenter les mécanismes sous-jacents aux phénomènes. C'est donc un modèle *"mécaniste"* au sens où la compréhension des phénomènes à un certain niveau de la hiérarchie du système est fondée sur la connaissance des processus existant à un niveau inférieur. Les modèles concernant les maladies infectieuses relèvent fréquemment de ce type lorsque la biologie de l'agent infectieux responsable de la maladie est bien connue. A l'inverse, les modèles *"fonctionnels"* s'appuient sur l'analyse des phénomènes observés par des voies statistiques pures. Autrement dit, il s'agit de modèles *"empiriques"* qui décrivent les comportements observables à un certain niveau de la hiérarchie du système, en termes d'attributs du même niveau. La pathologie multifactorielle répond généralement à ce type d'approche, la complexité des liens entre la maladie et les facteurs explicatifs potentiels ne permettant pas de s'appuyer sur une connaissance suffisamment affinée des effecteurs. D'ailleurs, d'après la typologie proposée par King et Soskolne [1988], les *"modèles associatifs"* ne peuvent être qu'empiriques, qu'ils soient déterministes ou stochastiques.

Au cours du travail de recherche en écopathologie, le chercheur est confronté à l'élaboration d'un *modèle conceptuel des données* dans la phase préliminaire de constitution de la base de données, à la nécessité de proposer un *pré-modèle conceptuel d'analyse* qui l'oblige à *"décrire les facteurs et leurs interrelations sous une forme claire et explicite"* [Mertens, 1976], à procéder à l'analyse des données qui permet de préciser les *modèles statistiques* régissant les liaisons entre la maladie et les facteurs explicatifs. Dans la mesure où l'écopathologie consiste à répondre à la question *"Etant donné un extrant déterminé (la performance), quel intrant ou combinaison d'intrants (les pratiques) peut produire ce résultat ?"* [Mertens, 1976], la problématique soulevée par la démarche écopathologique relève tout-à-fait d'un travail de modélisation. **D'un point de vue épistémologique, on peut considérer la démarche**

de modélisation consubstantielle de l'approche écopathologique. On peut parler de *"modélisation écopathologique"* [Sabatier, 1994]. Jusqu'à présent, notre choix a été de se cantonner dans une attitude de **recherche exploratoire** (au sens de l'identification de structures dans un univers de données). Il s'agit maintenant d'envisager la **modélisation dynamique** du système animal, composé de sous-systèmes en interrelations correspondant aux performances sanitaires et zootechniques.

Sans entrer dans les détails, ce qui n'est pas l'objet ici, rappelons brièvement les dix étapes de la modélisation décrit par Mertens [1976] dans le domaine des *"sciences de l'animal"* :

1. *Définir la problématique et les buts de la modélisation* : dans le cas qui nous préoccupe ici, il s'agit de modéliser le fonctionnement du système alimentation-pratiques-performances zootechniques-santé à l'échelle de la lactation et de la carrière des animaux. Cette étape doit permettre de déterminer, entre autres, les limites du modèle, le type de modèle et la nature des données requises.
2. *Observer et analyser le système* : il importe de préciser à ce niveau les composants du système et leurs interrelations, définir les intrants et les extrants ainsi que les facteurs d'influence à prendre en compte.
3. *Etablir un schéma conceptuel du modèle* incluant toutes les variables dont on fait l'hypothèse qu'elles peuvent influencer le système. La confrontation pluridisciplinaire facilite, à ce stade, la mise en place d'un schéma pertinent et simplifié.
4. *Formuler et mettre en oeuvre le modèle* en explicitant et testant les hypothèses au travers d'équations mathématiques qui peuvent être déjà proposées dans la littérature ou qu'il incombe de préciser, comme les équations différentielles permettant de modéliser la courbe de production laitière [Pérochon et al., 1995].
5. *Obtenir ou traiter les données* à disposition afin de quantifier les paramètres et les différentes variables entrant en jeu dans le modèle. Le recours à des données disponibles dans la littérature peut compléter les informations relevées au cours des enquêtes écopathologiques. Il est en effet souvent indispensable de faire appel à plusieurs sources, l'information étant rarement exhaustive avec une seule source.
6. *Vérifier et valider le modèle* c'est-à-dire s'assurer de sa précision et de son exactitude mathématique d'une part (vérification), et de sa capacité à représenter la réalité d'autre part (validation). L'objectif de la procédure de validation consiste à comparer la prédiction permise par le modèle à l'observation réelle permise par un jeu de données différent de celui qui a servi à construire le modèle.
7. *Améliorer le modèle* à la lumière de l'étape précédente, ce qui peut conduire à modifier l'estimation des paramètres. En tout état de cause, tout changement

opéré dans le modèle doit renvoyer aux hypothèses de base et à leur pertinence.

8. *Accepter le modèle en tant que représentation adéquate de la réalité*, ce qui doit améliorer la compréhension du système.
9. *Simuler c'est-à-dire utiliser le modèle pour étudier la dynamique du système*. Au cours de la simulation, la variation de tel ou tel paramètre permet d'apprécier le comportement du modèle. Autrement dit, la simulation consiste à "imiter" le fonctionnement d'un système biologique [Sorensen et Enevoldsen, 1992] : ainsi, peut-on simuler les baisses de production laitière en fonction du nombre et du type de mammites cliniques susceptibles d'être observées dans un troupeau.
10. *Après les essais de simulation, les résultats sont évalués et discutés* et peuvent renvoyer à de nouvelles questions pour la recherche. Ils peuvent conduire aussi à une optimisation du modèle, en particulier par sa simplification.

Les travaux entrepris récemment au laboratoire s'engagent résolument dans cette voie. En considérant le troupeau comme une agrégation d'individus indépendants, l'optique est de simuler l'effet à plus ou moins long terme de différentes stratégies de gestion du troupeau, et notamment des carrières, sur ses performances zootechniques et sanitaires. Les aspects économiques, qui se prêtent bien à ce type de démarche [Benett, 1992], ne sont pas abordés par le laboratoire, mais des projets allant dans ce sens sont en cours d'élaboration par des équipes partenaires [Seegers et al., 1994].

D. DU MODELE ECOPATHOLOGIQUE AU MODELE CATASTROPHIQUE

L'approche développée jusqu'à présent en écopathologie *"préconise une description abstraite des maladies d'élevage conçues comme manifestations, comme extériorisations, d'activités bio-physiques inobservables (boîte noire)"* [Sabatier, 1994]. Le modèle statistique permet dans ce cadre d'introduire les liens probabilistes entre les entrées et les sorties du système. L'inconvénient majeur de cette approche est qu'elle analyse les sorties de la boîte noire dont la biologie relève de l'observable, mais non le fonctionnement dynamique global. Dès lors, Sabatier [1994] considère *"qu'il est illusoire de trouver une causalité physique conduisant directement de la structure matérielle à la structure des outputs comportementaux (santé et performance)"*. Ainsi, les modèles inspirés des méthodes d'analyses de données [Tillon et Cayla, 1986] se limitent à dégager des corrélations entre entrées et sorties du système et se caractérisent souvent par la non-répétabilité des résultats. Ils sont surtout *"impuissants à rendre compte des situations dans lesquelles le système lui-même peut choisir entre plusieurs états stables"* [Sabatier, 1994], situations que Prigogine et Stengers ont qualifiées de bifurcation (cf. introduction). Or, les systèmes biologiques se caractérisent

généralement par l'existence de plusieurs états de stabilité et par une certaine autonomie de la réponse du système en fonction de telle ou telle situation, ce que Sabatier [1994] dénomme les *"comportements du système"*.

Les limites du modèle écopathologique ont conduit Sabatier et al. [1994] à proposer un *"modèle catastrophique"* issu de la théorie des catastrophes de R. Thom [1983]. Il s'agit d'une démarche enrichissante sur le plan cognitif, et sans doute plus efficace au plan de la prédiction qui renouvelle sensiblement la recherche en épidémiologie. Dans ce modèle, les facteurs de risque ou *"facteurs de contrôle"* (W) représentent le *niveau externe* du système. Ces facteurs conduisent à des états normaux ou pathologiques (X_W) qui représentent autant d'états de stabilité du *niveau interne* du système. Il s'agit là d'un concept implicite chez Canguilhem [1966] lorsqu'il affirme que *"le pathologique, ce n'est pas l'absence de norme biologique, c'est une autre norme, mais comparativement repoussée par la vie"*. Les qualités observables du système (les *descripteurs* Q) à des niveaux dépendants des états de stabilité internes représentent le *niveau perceptif*.

La modélisation catastrophique introduit donc un niveau interne qui formalise les causes efficientes des processus étudiés, ces causes étant à leur tour formalisées dans un système d'équation qui se concrétise par une courbe représentant une "fronce". Ainsi, pour un facteur de risque donné (W), on peut avoir soit maintien d'un état normal sur le plan sanitaire, soit basculement dans un état pathologique. Lorsqu'on fera varier le facteur W, la courbe $X(W)$ décrira la partie supérieure du graphe (état normal) jusqu'à b, avant de sauter brutalement sur la branche inférieure (état pathologique). Le système *"change de forme"* [Sabatier, 1994]. La réponse X pour des valeurs de W comprises entre a et b est indéterminée et dépend d'une *"décision du système"* qui, soit continue de se réguler à un niveau donné, soit passe brutalement à un autre niveau. **La maladie est dès lors considérée comme un "accident de forme" dans un espace donné (l'espace des conditions d'élevage)**. Les modèles proposés dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires tels que les modèles catastrophiques répondent parfaitement à l'étude de ces changements de forme.

E. DE LA MODELISATION A L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'intelligence artificielle (IA) se fixe comme objectif de modéliser non pas le monde lui-même, mais les connaissances sur ce même monde. Plutôt que de simuler ou de prédire le comportement naturel d'un système, l'IA se propose de représenter *"symboliquement les connaissances disponibles sur le problème à résoudre"*, puis de mettre en oeuvre *"informatiquement les représentations obtenues afin de calculer des solutions"* [Sabatier, 1994]. En pathologie animale, le rôle de l'observateur (vétérinaire ou éleveur), c'est-à-dire de l'interpréteur humain, dans les procédures de reconnaissance des *"formes pathologiques"* a conduit la

recherche à proposer des systèmes-experts qui constituent des outils permettant de formaliser les savoirs nécessaires à la maîtrise des troubles sanitaires mettant en jeu des déterminismes multifactoriels [Sabatier, 1991].

Pour résoudre un problème pathologique, le vétérinaire objective la maladie observée : il détermine la nature des troubles, leur gravité, leur évolution et les facteurs de risque liés à l'animal ou au troupeau, avant de proposer une intervention thérapeutique. En clair, il raisonne en fonction de *modèles de causalité* (agent causal) ou d'*association* (facteurs de risque) avant de prendre sa décision thérapeutique (*modèle d'action*). L'intervention du vétérinaire relève donc de la construction d'un raisonnement logique que le système-expert permet de reproduire informatiquement en reconstituant les modèles élaborés par ceux qui possèdent la connaissance du phénomène étudié. Dans ce contexte, le contrôle d'un système d'élevage déterminé n'est pas conçu à travers une association statistique entrée-sortie, mais par une association qualitative qui peut se formuler :

"si (Paramètres de contrôle (entrées)) alors (Etat interne (sorties))".

L'expertise recueillie pour ce type d'outil peut s'appuyer prioritairement sur des résultats d'enquêtes écopathologiques comme ce fut le cas du système-expert consacré aux *"troubles du porcelet de la naissance au post-sevrage"* proposé par Sabatier et Fayet [1994]. Les connaissances peuvent ultérieurement être formalisées et légitimées par des études conduites en station. Le système-expert permet en fait aux intervenants de l'exploitation de *"dire la situation de l'élevage"* et d'accréditer le *"savoir des experts (...), mais également une légitimation des pratiques réelles des éleveurs"* [Sabatier et al., 1994].

Cependant, les systèmes-experts en pathologie animale n'ont pas suscité l'intérêt qu'on en attendait. Ce phénomène n'est pas spécifique au domaine vétérinaire [Sabatier, 1994], mais il n'est pas établi que cette situation soit définitive. A ce titre, la démarche écopathologique conserve toute sa place comme source d'enrichissement des bases de connaissances.

F. DE LA MODELISATION AUX ENQUETES DE TERRAIN

La modélisation est un outil de plus dans la panoplie du chercheur en épidémiologie. Il ne doit pas pour autant occulter l'absolue nécessité d'un retour sur le terrain. Ce retour, dans le domaine qui nous concerne, se justifie pour deux raisons :

- Tout modèle n'est que la représentation de la réalité, mais non la réalité elle-même [Zeger, 1991], affirme même que *"tous les modèles sont faux, mais certains sont plus utiles que d'autres"*. Aussi, l'étape de validation est-elle primordiale dans la démarche générale de modélisation. La validation implique le

recours à des jeux de données différents de ceux qui ont conduit à constituer le modèle. Ces données peuvent être déjà disponibles et des échanges entre équipes peuvent faciliter l'accès à des informations recueillies dans des contextes diversifiés. Mais parce que la validation peut exiger un relevé particulier -par exemple, des mesures hebdomadaires de la production laitière pour modéliser la courbe de production des vaches [Pérochon et al., 1995] alors que les données disponibles du Contrôle laitier sont relevées mensuellement, des enquêtes spécifiques sont parfois indispensables ;

- Les systèmes d'élevage sont en constante évolution. A l'échelle de l'exploitation, la modification des pratiques transforme continuellement la nature des sorties du système, et les exigences de la qualité, tant des produits (qualité du lait par exemple) que de la manière de produire (le bien-être animal par exemple) sont susceptibles d'accentuer les changements observés depuis quelques décennies. Ainsi, les pratiques préventives destinées à juguler l'importance des mammites subcliniques dans les troupeaux laitiers (ce qu'on a appelé le *"plan anglais"*) ont modifié en quelques années le *"profil pathologique de la mamelle"* [Philipot et al., 1995] dans les élevages (maintien, voire augmentation des mammites cliniques à caractère aigu dans des troupeaux à taux cellulaire faible). La poursuite de l'amélioration génétique du cheptel et les innovations en matière d'alimentation du bétail contribuent également à la transformation permanente du *"matériel animal"*, susceptible de faire varier son comportement vis-à-vis du *"pathologique"*. Le recours-retour à des observations en situation réelle s'avère en conséquence irremplaçable pour évaluer les enjeux sanitaires de ces évolutions.

S'ajoutent à ces remarques, le goût personnel pour le travail de terrain, la rencontre avec les éleveurs et plus généralement les acteurs du sanitaire, la confrontation (au sens de *"l'expérience partagée"* décrite par Darré, 1994) avec les *"savoirs populaires"* qui, en complément de l'activité de laboratoire (analyse statistique, expérimentation, bibliographie), font l'intérêt d'une recherche décidément *"sortie de sa tour d'ivoire"*, pour reprendre une formulation eculée.

Enfin, le retour sur le terrain introduit implicitement le caractère opérationnel des résultats des recherches en écopathologie : *"plan de prévention"*, *"mode d'emploi des facteurs de risque"*, *"programme de vulgarisation sanitaire"* sont autant de finalités concrètes qui ne valent que par leur application effective dans les élevages. La notion de système d'élevage est, à ce niveau, primordiale. En effet, un raisonnement qui consiste à apporter une solution normative à un problème de santé fait abstraction de la diversité des systèmes d'exploitation et des pratiques mises en oeuvre par les éleveurs pour répondre à leurs objectifs de production. Il importe donc de raisonner les problèmes sanitaires dans la logique globale de l'exploitation afin de proposer des actions de prévention adaptées à la diversité des systèmes d'élevage. En France, l'expérience acquise au

Centre d'écopathologie animale en la matière est tout-à-fait pertinente [Peretz *et al.*, 1994]. Personnellement, j'ai contribué à la mise en oeuvre de tels programmes à l'issue des études écopathologiques menées en milieu tropical

[Lancelot *et al.*, 1994 ; Quirin *et al.*, 1994], programmes dont la méthodologie générale a été publiée dans un ouvrage [Faye *et al.*, 1994b].

III - CONCLUSION

Si, conformément à ce qui a été avancé dans l'introduction, l'écopathologie fait le choix de la complexité, elle ne saurait réduire en une idée simple ou en un ensemble de lois clairement définies les relations observables entre un état de santé et les paramètres d'un environnement sans cesse mouvant. *"La complexité est un mot problème et non un mot solution"* déclarait Edgar Morin dans son "Introduction à la pensée complexe" [1990], et il rajoutait : *"si la complexité est non pas la clé du monde, mais le défi à affronter, la pensée complexe est non pas ce qui évite ou supprime le défi, mais ce qui aide à le relever..."*. La perception de la pathologie animale a suivi de fait au cours de l'histoire une complexification croissante. Chez les bovins, Aristote ne distinguait que deux maladies *"dont l'une s'appelle goutte, l'autre le crauros ; dans la goutte, ils enflent des pieds, mais ni ils ne meurent, ni ils ne perdent leurs sabots ; lorsqu'ils ont le crauros, le souffle devient chaud et dense (...), les oreilles tombent, l'animal ne peut pas manger. Les boeufs meurent rapidement, chez ceux qu'on ouvre, le poumon apparaît pourri."* [Aristote. Histoire des animaux. Ed. Gallimard, 1994].

Ces observations n'étaient pas fondamentalement différentes de celles formulées dans le papyrus égyptien de Kahun, le plus ancien document vétérinaire de l'histoire humaine [Walker, 1972]. La *"théorie déterminante de la causalité des maladies"* [Schwabe, 1982] est longtemps centrée sur le sumaturel, puis sur les "miasmes" et les "déséquilibres humoraux". L'ère pastorienne ouvre la voie des agents infectieux. En 1948, Meraville, consacrant un chapitre de son livre de vulgarisation sur la santé de la

vache laitière, se limitait encore à quelques maladies monofactorielles prépondérantes à l'époque comme la tuberculose, la fièvre aphteuse, le charbon et *"la lèche"* (pica). Fondamentalement, l'observation de la pathologie animale paraissait circonscrite à quelques entités nosologiques bien définies suivant un schéma classique : symptômes, diagnostic, pronostic, traitement, prévention.

Nous avons pu constater au cours des recherches exposées ici, que la complexité étiologique s'est accentuée avec les évolutions récentes des systèmes d'élevage, la place du sanitaire dans ces systèmes et la perception affinée du pathologique eu égard aux objectifs et aux contraintes économiques et sociaux des éleveurs. En généralisant le rôle des pratiques et du milieu, *"l'écopathologie a pulvérisé la relation causale traditionnelle (...) en une multitude de relations, conçues comme à la fois indépendantes et interférant les unes avec les autres"* [Sabatier et Guigal, 1994]. L'écopathologie tente, par ses objectifs et ses méthodes, de relever le défi de cette complexité. *"Dans ce contexte, de longues et fructueuses pages de la science épidémiologique restent à écrire"* [Lazar, 1994]. Sur le plan pratique, l'écopathologie propose aussi de passer du remède (la *"miraclomycine"* évoquait Libersa en 1983) relevant de choix extérieurs à l'exploitation, à la prise en charge par les acteurs du sanitaire de la gestion de la santé animale. Le vétérinaire écopathologiste n'est plus alors *"le médecin des animaux"*, mais devient un *"ingénieur de la santé"*.

IV - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Pour toute précision concernant la bibliographie, nous renvoyons au document original de la thèse disponible auprès de l'auteur.

