

# APPORT DE LA MODELISATION POUR L'AIDE A LA DECISION LORS D'EPIZOOTIE DE FIEVRE APHTEUSE \*

B. Durand<sup>1</sup>, F. Moutou<sup>1</sup>, O. Mahul<sup>2</sup>

**RESUME :** Plusieurs travaux de modélisation ont été utilisés en Grande-Bretagne au cours de l'épizootie de fièvre aphteuse de 2001 pour justifier la stratégie de lutte adoptée par les autorités anglaises. Cette étude présente un modèle déterministe d'épizootie de fièvre aphteuse qui associe un modèle épidémiologique conçu pour générer l'allure d'une épizootie moyenne (dans un contexte démographique et épidémiologique donné) et un modèle économique qui calcule les coûts directs et indirects provoqués par une telle épizootie. Ce modèle est utilisé pour comparer trois stratégies de lutte (sans abattage préventif, avec abattage préventif et avec vaccination d'urgence) dans deux régions françaises (Bretagne et Provence-Alpes-Côte d'Azur). Les résultats montrent que la stratégie avec abattage préventif est optimale en Bretagne et que la stratégie vaccinale n'est jamais optimale. Ces résultats ne concernent cependant qu'une épizootie moyenne et suggèrent quelle stratégie devrait être choisie a priori par les décideurs. Ils n'excluent pas le recours à la vaccination d'urgence si l'épizootie s'avérait prendre une grande ampleur. Le modèle a été utilisé pour formaliser cette prise de décision difficile en comparant les coûts associés aux différentes options : lancer une campagne de vaccination préventive immédiatement ou ne pas le faire et attendre d'avoir plus d'informations sur l'ampleur probable de l'épizootie. Finalement, les intérêts et les limites de cette étude sont discutés, à la lumière de la façon selon laquelle la modélisation a été utilisée pour l'aide à la décision au cours de l'épizootie européenne de l'année 2001.

**SUMMARY :** Several modelling studies have been used during the 2001 foot-and-mouth disease in Great Britain to justify the control strategy chosen by the animal health authorities. This study presents a deterministic model for foot-and-mouth disease epidemic which combines an epidemiologic model devised to generate the mean shape of an epidemic (in a given demographic and epidemiological context) with an economical model that computes the direct and indirect costs induced by such an epidemic. The model is used to compare three control strategies (without pre-emptive slaughter, with pre-emptive slaughter and with an emergency vaccination) in two French regions (Britanny and Provence-Alpes-Côte d'Azur). Results show that the pre-emptive slaughter strategy is optimal in Britanny and that the vaccination strategy is never optimal. However, these results do not rule out the use of an emergency vaccination campaign if the epidemic turns out to have a large scale. The model has been used to formalize this difficult decision-making process through a comparison of the costs associated with the different options: immediately launch a preventive vaccination campaign, or not to do so and wait for further informations about the probable scale of the epidemic. Finally, the interests and the limits of this study are discussed with regard to how modelling has been used for decision-making during the 2001 European epidemic.



\* Texte de l'exposé présenté à la Journée AEEMA, 14 juin 2002

<sup>1</sup> AFSSA LERPAZ, 22 rue Pierre Curie, F-94703 Maisons-Alfort Cedex, France

<sup>2</sup> INRA, Département d'économie, rue Adolphe Bobierre, CD 61103, F-35011 Rennes Cedex, France

## I - INTRODUCTION

L'épizootie de fièvre aphteuse (FA) qui a sévi en 2001 en Europe a démontré une fois de plus l'extrême contagiosité de cette maladie et son caractère de risque sanitaire majeur pour l'élevage dans les pays occidentaux. La couverture médiatique dont a bénéficié cette épizootie a fait prendre conscience au grand public de la rigueur des mesures de lutte employées et de nombreuses voix se sont élevées pour réclamer l'utilisation de la vaccination, comme alternative aux seules mesures sanitaires. De fait, l'usage d'une campagne de vaccination d'urgence (en association avec l'application des mesures sanitaires) a montré son efficacité par le passé [Leforban, 2002], et la vaccination reste un outil important pour la lutte contre une épizootie de FA.

L'objectif de cet article n'est cependant pas d'analyser le bien-fondé des mesures de lutte employées en 2001, mais de montrer, de façon plus générale, comment la modélisation peut apporter des éléments objectifs aux décideurs pour le choix d'une stratégie de lutte contre la FA.

Un tel choix est en effet complexe et doit prendre en compte à la fois les conséquences de l'épizootie et celles des mesures mises en œuvre. Ce choix n'est par ailleurs pas figé : au cours d'une épizootie, en fonction de l'évolution de la situation, il peut s'avérer nécessaire de modifier la stratégie de lutte fixée *a priori* (hors contexte épizootique) ; par exemple, en décidant d'une campagne de vaccination d'urgence. La question qui se pose alors est de savoir à quel moment cette décision doit être prise. Là encore, il est nécessaire de prendre en compte à la fois les

conséquences de l'épizootie et celles des mesures mises en œuvre.

Ces conséquences sont très variées et plus ou moins quantifiables : elles peuvent aller, par exemple, du coût de l'indemnisation des éleveurs aux pertes génétiques dues à l'abattage de troupeaux sélectionnés ou, sur le long terme, aux modifications structurelles de l'élevage dans le pays touché, dues à la non-reprise d'activité de certains éleveurs dont le troupeau a été abattu. La méthode la plus communément employée pour mesurer ces conséquences consiste à analyser les pertes économiques induites par une épizootie. Si elle ne s'intéresse qu'aux conséquences quantifiables en termes monétaires, cette méthode a l'avantage évident de permettre d'exprimer celles-ci en une unité de mesure unique, et donc de permettre de comparer aisément entre elles différentes stratégies de lutte contre la FA.

En 1999, un travail de recherche financé par la DGAI a été mené en collaboration entre l'INRA (pour la partie économie) et l'Afssa (pour la partie épidémiologie) afin de mettre au point un modèle d'épizooties de FA qui permette d'en estimer les conséquences économiques directes et indirectes.

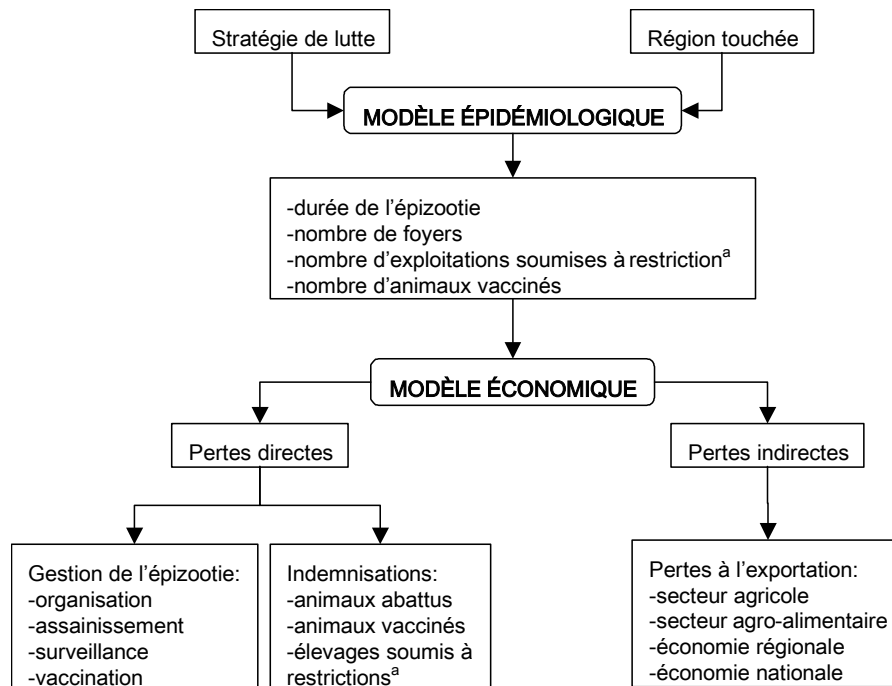
Nous présentons d'abord les deux volets de ce modèle : le volet épidémiologique et le volet économique. Puis nous montrons la façon selon laquelle ce modèle a pu être utilisé pour comparer différentes stratégies de lutte entre elles, ainsi que les résultats obtenus. Enfin, les intérêts et les limites de cette approche sont discutés, à la lumière de l'épizootie européenne de l'année 2001.

## II - MODELISATION D'ÉPIZOOTIES DE FIEVRE APTEUSE

La structure générale du modèle (figure 1) comprend une partie épidémiologique et une partie économique. Le modèle épidémiologique, à partir d'un certain nombre de paramètres qui décrivent à la fois la stratégie de lutte et la région touchée, produit un ensemble de résultats synthétiques qui

décrivent l'épizootie en termes d'ampleur (nombre de foyers) et de durée (intervalle de temps entre la découverte du premier et du dernier foyer). Le modèle économique transforme ces résultats en grandeurs monétaires, en estimant les pertes directes et indirectes dues à l'épizootie.

**FIGURE 1**  
**Structure générale du modèle**



<sup>a</sup> Exploitations non infectées situées dans les zones de protection et de surveillance

## 1. LE MODELE EPIDEMIOLOGIQUE

Le modèle épidémiologique [Durand et Mahul, 2000] a pour objet de générer l'allure d'une épizootie moyenne dans une région donnée et pour une stratégie de lutte prédéfinie. Il s'agit d'un modèle déterministe à transitions d'états dont l'unité est l'élevage moyen de la région concernée et dont le pas de temps est la demi-semaine.

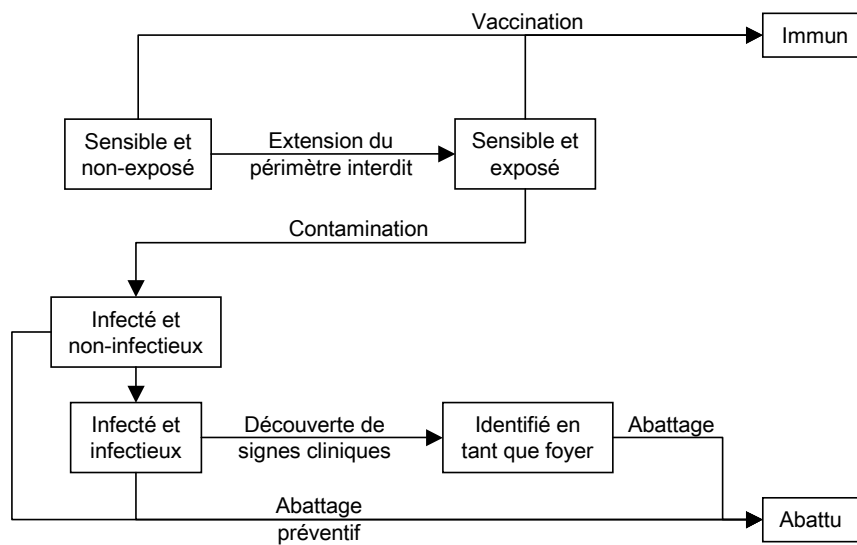
Le modèle ne s'intéresse qu'aux épizooties mono-centriques : on fait l'hypothèse qu'à un instant donné, la zone touchée peut être séparée en une zone interne au sein de laquelle a lieu la contagion entre élevages, entourée par un anneau où les élevages ne sont pas exposés à la contagion. On peut alors distinguer sept états sanitaires pour un élevage (figure 2) : sensible et non exposé (l'élevage est situé dans la zone externe), sensible et exposé (l'élevage est situé dans la zone interne), infecté et non infectieux (il existe des animaux infectés, mais tous sont encore en incubation), infecté et infectieux (il existe des animaux excréteurs de virus, mais la maladie n'a pas été identifiée), identifié en tant que foyer (des signes cliniques et/ou

biologiques ont permis d'identifier la maladie), abattu (qu'il s'agisse d'un abattage préventif ou de l'abattage d'un foyer) et immun (suite à la vaccination des animaux). Le modèle décrit, sous la forme d'équations aux différences, les transitions entre ces états (figure 2).

Parmi ces transitions, la plus importante est bien sûr celle qui correspond à la contamination d'un élevage sensible et exposé. Le taux de transition correspondant dépend du nombre d'élevages infectieux et d'un paramètre essentiel : le taux de dissémination. Ce taux est défini [Miller, 1976] comme le nombre moyen d'élevages (quel que soit leur état sanitaire) dans lesquels l'agent infectieux est introduit à partir d'un élevage infectieux donné, en un pas de temps.

Ce paramètre est un paramètre composite qui recouvre à la fois des facteurs liés à la zone touchée (densité d'élevages, taille, espèces concernées) et des facteurs liés à l'efficacité des mesures de lutte. De ce fait, ce taux de dissémination n'est pas constant au cours du temps mais diminue afin de prendre en compte l'effet des mesures de lutte.

**FIGURE 2**  
**Diagramme d'états du modèle épidémiologique**



Des estimations de ces taux de dissémination ont été proposées [Miller, 1976] à partir des données de l'épizootie britannique de 1967-1968. On peut cependant penser que, du fait de l'évolution des structures d'élevage, ces estimations ne sont plus valides aujourd'hui. Aussi, les taux de dissémination ont été estimés en utilisant un programme de simulation spécifique individu-centré [Durand, 1996] qui prend notamment en compte explicitement les caractéristiques de l'élevage dans la zone touchée.

## 2. LE MODELE ECONOMIQUE

Le modèle économique [Mahul et Durand, 2000] a pour objet d'évaluer les coûts directs et indirects de l'épizootie.

Plusieurs catégories de coûts directs peuvent être distingués :

- le coût de la gestion de l'épizootie comprend les coûts d'organisation et de mise en œuvre des mesures d'abattage, de désinfection et de destruction des carcasses (ainsi que de vaccination le cas échéant),
- l'indemnisation des éleveurs dont le cheptel a été abattu, à hauteur de la valeur de l'animal vivant,
- l'indemnisation des éleveurs dont l'élevage a été vacciné (on suppose que les

animaux vaccinés sont abattus après la fin de l'épizootie) à hauteur de 50% de la valeur de l'animal vivant (les carcasses pouvant être partiellement commercialisées),

- les pertes de production subies par les éleveurs dont le cheptel est situé dans la zone soumise à restriction.
- Les coûts indirects correspondent aux pertes à l'exportation dues à la mise en place d'embargos commerciaux par les pays tiers. Les pertes liées aux embargos touchent bien sûr le secteur de l'élevage, mais vont également affecter indirectement d'autres secteurs d'activité. C'est pourquoi une analyse multi-sectorielle a été mise en œuvre afin de prendre en compte les interactions entre les différents secteurs économiques. Cette analyse est fondée sur une matrice de flux entre industries et est fondée sur deux hypothèses cruciales :
  - pour un secteur industriel donné, il n'y a pas de substitution de matière première en cas d'épizootie et le volume des produits est proportionnel à celui des matières premières,
  - pour chacun des secteurs industriels, le niveau de production est complètement fixé par la demande.

L'analyse multi-sectorielle permet ainsi de calculer les répercussions en chaîne d'une

baisse de la demande (liée à la mise en place d'un embargo) sur les différents secteurs

industriels du pays.

### III - AIDE A LA DECISION POUR LE CHOIX D'UNE STRATEGIE DE LUTTE

Le modèle a été appliqué à deux régions françaises très différentes : la Bretagne et Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA). Le tableau I détaille les caractéristiques démographiques de ces deux régions et les valeurs estimées des taux de dissémination périodiques.

Trois stratégies de lutte contre la FA ont été analysées. La première (notée A) correspond à la mise en œuvre de mesures d'abattage dans les foyers uniquement. La seconde (notée P) combine l'abattage dans les foyers avec des mesures d'abattage préventif. La troisième (notée V) combine l'abattage dans les foyers avec la mise en œuvre d'une campagne de vaccination d'urgence à partir de la fin de la première semaine. Pour chacune des trois stratégies, ces mesures offensives sont bien sûr associées à des mesures défensives (mise en place de périmètres contrôlés, etc.). A titre d'exemple, la figure 3 montre l'évolution dans le temps de la répartition des élevages infectés par état sanitaire pour une épizootie ayant lieu en Bretagne avec la stratégie de lutte A. On constate que le nombre de cheptels infectés croît exponentiellement jusqu'à la découverte

du premier foyer (demi-semaine zéro) du fait que le taux de dissémination maximal est appliqué durant cette phase (tableau I). Par la suite, la décroissance du nombre de cheptels infectés reflète l'effet des mesures de lutte, elles-mêmes modélisées par la décroissance des taux de dissémination (tableau I). L'épizootie simulée se solde par un total de 176 foyers et une durée d'environ deux mois.

#### 1. RESULTATS DU MODELE EPIDEMIOLOGIQUE

Les trois stratégies de lutte ont été comparées pour chacune des deux régions. Le tableau II détaille les résultats obtenus par le modèle épidémiologique. On constate que, pour les deux régions, la durée d'épizootie la plus courte et le nombre de foyers le plus faible sont obtenus avec la stratégie P. Par contre, du fait des abattages préventifs, le nombre de cheptels abattus est plus élevé avec cette stratégie qu'avec la stratégie V. Pour la Bretagne, ce nombre de cheptels abattus reste cependant inférieur avec la stratégie P qu'avec la stratégie A.

TABLEAU I

**Valeurs des principaux paramètres démographiques et épidémiologiques pour deux régions françaises : Bretagne et Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA).**

		Bretagne	PACA
Nombre d'élevages au km <sup>2</sup>		1,3	0,05
Composition d'un élevage moyen	Bovins	53	11
	Porcins	255	0
	Ovins et caprins	0	471
Taux de dissémination estimés	Avant le premier foyer	9,32	6,47
	Période* 1	1,04	2,20
	Période 2	1,04	2,20
	Période 3	0,32	0,30
	Période 4	0,32	0,30
	Ensuite	0,20	0,30

\* Une période dure une demi-semaine.

FIGURE 3

Evolution dans le temps de la répartition des élevages infectés par état sanitaire pour une épizootie ayant lieu en Bretagne avec la stratégie de lutte A (abattage dans les foyers uniquement).

L'origine de l'axe des abscisses correspond à la période au cours de laquelle le premier foyer est identifié.

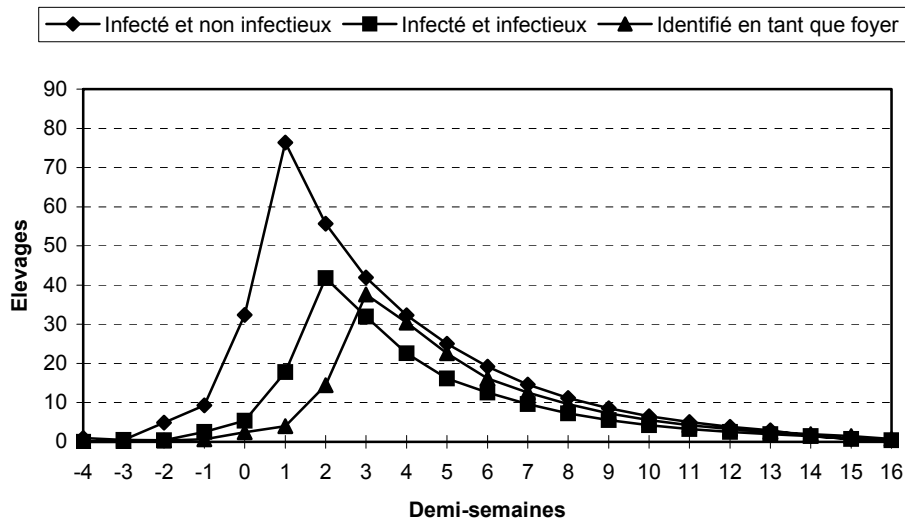


TABLEAU II

Comparaison des épizooties moyennes obtenues avec les stratégies A (abattage dans les foyers), P (abattage dans les foyers et abattage préventif) et V (abattage dans les foyers et vaccination) en Bretagne et en PACA

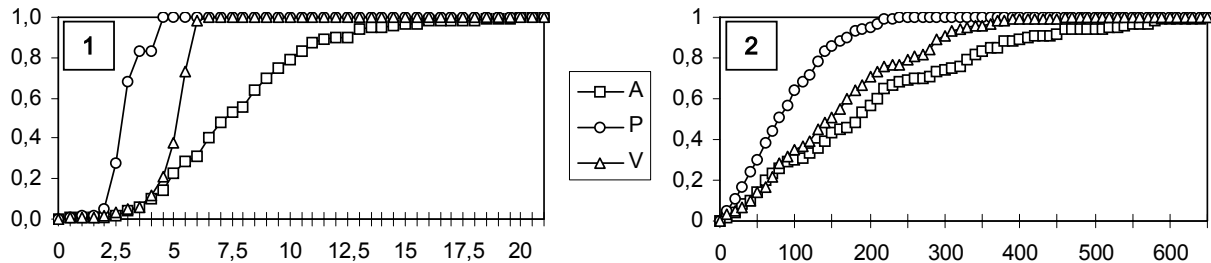
	Bretagne			PACA		
	A	P	V	A	P	V
Durée (semaines)	8	3	5.5	3.5	3	3.5
Nombre de cheptels infectés	176	85	151	15	12	15
Nombre de cheptels abattus	176	168	151	15	23	15
Nombre d'animaux abattus	54 208	51 744	46 508	7 230	11 086	7 230
Nombre de cheptels vaccinés	0	0	1 819	0	0	50
Nombre d'animaux vaccinés	0	0	445 457	0	0	24 100

Les résultats obtenus dépendent de façon importante de la valeur des taux de dissémination. Aussi une analyse de sensibilité a-t-elle été menée pour évaluer l'impact de changements de la valeur de ces paramètres sur les résultats finaux. Pour chacune des trois stratégies de lutte étudiées et dans le contexte de la Bretagne, 100 simulations ont été effectuées, en générant pour chacune d'elles des valeurs aléatoires de taux de dissémination selon une loi normale dont la moyenne  $\mu$  est le taux de dissémination estimé et l'écart type est  $0,5 \mu$ . Les fonctions de

répartition des tailles (nombre de foyers) et des durées des épizooties simulées (figure 4) montrent, par exemple, que dans 80% des simulations, le nombre de foyers a été inférieur à 130 pour la stratégie P, 270 pour la stratégie V et 340 pour la stratégie A. Sur ces deux graphiques, la stratégie optimale est donc celle pour laquelle la courbe est située au dessus des autres : on constate que, dans le cas de la Bretagne, c'est la stratégie P qui devrait être favorisée, suivie de la stratégie V puis de la stratégie A.

FIGURE 4

**Fonctions de répartition des durées (1) et des tailles (2) d'épizooties obtenues avec des taux de dissémination générés aléatoirement : comparaison des stratégies A (abattage dans les foyers), P (abattage dans les foyers et abattage préventif) et V (abattage dans les foyers et vaccination) en Bretagne.**



## 2. RESULTATS DU MODELE ECONOMIQUE

Les coûts directs unitaires de gestion de l'épizootie (coût des programmes d'assainissement, de surveillance, coût de l'organisation, etc.) ont été estimés d'après les données de l'épizootie bretonne de 1981. Les autres coûts unitaires directs (indemnisation des animaux, coût de l'immobilisation d'un élevage, etc.) ont été estimés sur avis

d'experts. Les résultats (tableau III) montrent des chiffres nettement supérieurs en Bretagne qu'en PACA. En Bretagne, avec la stratégie P, les coûts directs sont quatre fois moindres qu'avec la stratégie V, et 13% inférieurs à ceux de la stratégie A. En PACA, par contre, les coûts directs les plus faibles sont obtenus avec la stratégie A, et sont plus de deux fois plus élevés avec la stratégie V.

TABLEAU III

**Pertes directes (millions de francs) dues à une épizootie avec les stratégies A (abattage dans les foyers), P (abattage dans les foyers et abattage préventif) et V (abattage dans les foyers et vaccination), en Bretagne et en PACA.**

Stratégie	Bretagne			PACA		
	A	P	V	A	P	V
Coûts totaux	243	211	944	13	18	30
Subventions françaises	52	49	230	3	4	7
Subventions de l'UE	78	74	335	4	6	11
Coûts non subventionnés	113	88	379	6	8	12

Un paramètre clé des coûts indirects est la durée des embargos imposés par les pays tiers. Ces durées ont été fixées grâce aux avis des experts et à la lumière des épizooties italienne de 1993 et grecque de 1994. Deux catégories de produits ont été définis :

- Produits I : animaux vivants et viande des animaux des espèces sensibles ; lait.
- Produits II : produits laitiers autres que lait.

Le scénario retenu est le suivant : pendant l'épizootie, un embargo national est mis en place par tous les pays. Après la fin de

l'épizootie, les pays de l'Union Européenne lèvent cet embargo sur les produits de type II mais maintiennent un embargo régional pour les produits de type I pendant 6 mois. Quant à eux, les autres pays maintiennent un embargo national sur les produits de type I pendant 12 mois et sur les produits de type II pendant 6 mois.

Les coûts totaux (directs et indirects) liés à une épizootie sont détaillés dans le tableau IV. En Bretagne, ces résultats montrent que la stratégie P serait la moins coûteuse, et il est intéressant de constater que les coûts directs

(tableau III) ne constituent qu'une part mineure des coûts totaux : 6,1% des coûts régionaux et 1,3% des coûts nationaux. En PACA, les coûts obtenus avec les stratégies A et P sont comparables. Ils sont légèrement plus élevés

avec la stratégie V (augmentation de 13% pour l'économie nationale). Une analyse de sensibilité analogue à celle menée sur les résultats du modèle épidémiologique confirme ces résultats [Mahul et Durand, 2000].

TABLEAU IV

**Pertes totales nettes (millions de francs) dues à une épizootie avec les stratégies A (abattage dans les foyers), P (abattage dans les foyers et abattage préventif) et V (abattage dans les foyers et vaccination), en Bretagne et en PACA.**

Région et stratégie		Economie régionale <sup>a</sup>			Economie nationale <sup>b</sup>		
		Secteur élevage	Secteur agricole	Pertes globales	Secteur élevage	Secteur agricole	Pertes globales
Bretagne	A	1 252	1 378	3 974	7 266	7 907	20 299
	P	1 101	1 211	3 473	5 248	5 727	15 687
	V	1 840	2 001	5 298	11 948	12 930	30 428
PACA	A	74	81	157	4 880	5,321	14 498
	P	75	81	156	4 681	5 106	14 039
	V	83	90	171	5 697	6 203	16 353

<sup>a</sup> Coûts nets des financements gouvernementaux et européens

<sup>b</sup> Coûts nets des financements européens

Si le tableau IV montre que les coûts régionaux sont bien inférieurs en PACA qu'en Bretagne, du fait de l'embargo national imposé par les pays tiers autres que ceux de l'Union Européenne, les coûts supportés par l'économie nationale ont un niveau similaire, que l'épizootie se déroule en PACA ou en Bretagne.

Enfin, un autre scénario de durée d'embargo a été étudié, qui suppose que tous les pays tiers appliquent le principe de zonage recommandé par l'OIE et que tous les embargos sont régionaux. Les niveaux de coûts obtenus sont dans ce cas plus faibles [pour les détails, voir Mahul et Durand, 2000] mais le classement des stratégies de lutte (de la moins coûteuse à la plus coûteuse) n'est pas modifié.

### 3. LA DECISION DE MISE EN ŒUVRE D'UNE CAMPAGNE DE VACCINATION D'URGENCE

Les résultats du modèle économique sont bien sûr fortement dépendants des valeurs des paramètres du modèle épidémiologique et notamment des valeurs des taux de dissémination. A titre d'exemple, en Bretagne, si le dernier taux de dissémination passe de 0,20 à 0,45, les pertes totales pour l'économie française passent à 38 595 millions de francs (mF) avec la stratégie A, 32 989 mF avec la stratégie P, et 30 794 mF avec la stratégie V.

Dans ce cas, c'est donc la stratégie V qui devient optimale.

La stratégie optimale est donc étroitement liée à la situation épidémiologique réelle. Or, s'il est aisé *a posteriori* de dire que les pertes totales dues à l'épizootie auraient été moindres si une campagne de vaccination d'urgence avait été décidée à la semaine x, la situation des décideurs, à cette même semaine x, est beaucoup plus délicate.

En effet, le contexte dans lequel la décision doit être prise se caractérise par deux éléments : l'incertitude liée au fait que la situation épidémiologique réelle n'est que partiellement connue (particulièrement en début d'épizootie) d'une part, et le caractère irréversible des conséquences de la décision d'autre part : une fois entamée, une campagne de vaccination doit être menée jusqu'à son terme et n'aurait aucun sens si elle n'était exécutée que partiellement.

On conçoit que la conjonction de ces deux éléments forme un contexte de prise de décision particulièrement difficile : incertitude et irréversibilité doivent peser d'un poids égal dans la balance lors de la prise de décision. En effet, si les décideurs sont plus sensibles à l'incertitude qu'à l'irréversibilité, ils auront tendance à appliquer le principe de précaution : s'il existe une possibilité (même peu probable) que l'incertitude sur la situation épidémiologique réelle cache une situation



grave, il est préférable de lancer immédiatement une campagne de vaccination d'urgence. Une telle décision peut cependant s'avérer désastreuse si la levée de cette incertitude (grâce aux résultats des enquêtes épidémiologiques en cours lors de la prise de décision) vient à révéler que la situation initiale n'était pas si grave que cela. A l'inverse, si les décideurs sont plus sensibles à l'irréversibilité qu'à l'incertitude, du fait des sur-coûts importants induits par la vaccination, ils auront tendance à repousser le plus tard possible la prise de décision, jusqu'au moment où l'incertitude aura été totalement levée et où on sera sûr que la situation épidémiologique justifie bien l'emploi de la vaccination. Là encore, cette non-prise de décision peut s'avérer désastreuse au plan épidémiologique et au plan économique, puisqu'une campagne de vaccination d'urgence entreprise trop tardivement risque fort de s'avérer inefficace.

En pratique, trois options s'offrent donc aux décideurs à la fin de la semaine  $x$ :

- décider de lancer une campagne de vaccination,
- ou s'en tenir à une stratégie sans vaccination,
- ou repousser cette prise de décision à la semaine  $x + 1$ .

Le choix entre les deux premières options doit prendre en compte les données épidémiologiques disponibles et l'avis des experts quant à la probabilité d'occurrence d'une épizootie de grande ampleur. Le choix de repousser ou pas la prise de décision doit prendre en compte l'existence de mesures de recherche active de foyers (enquêtes épidémiologiques) susceptibles d'apporter plus d'éléments pour la prise de décision à la semaine  $x + 1$ .

Le modèle a été utilisé pour formaliser ce processus de prise de décision [Mahul et Gohin, 1999] dans un contexte simplifié : celui des deux premières semaines d'une épizootie, en Bretagne. On suppose que l'on se place à la fin de la première semaine d'épizootie et que la stratégie A est utilisée. Les auteurs se sont intéressés à deux hypothèses épidémiologiques : une épizootie de grande ampleur, modélisée par une valeur élevée de taux de dissémination ( $\tau$ ) au cours de la seconde semaine ( $\tau = \tau^+$ ), et une épizootie de faible ampleur, modélisée par une valeur faible de ce taux de dissémination ( $\tau = \tau^-$ ). Dans les exemples proposés ci dessous, les valeurs suivantes ont été utilisées :  $\tau^- = 0,30$  et  $\tau^+ = 0,48$ .

Deux scénarios de prise de décision ont été étudiés. Dans le premier scénario (scénario 1), les mesures de recherche active de foyers (enquêtes épidémiologiques, dépistage actif) ont été mises en œuvre trop tardivement (ou avec trop peu de moyens) et le décideur sait qu'il ne disposera pas d'informations suffisantes à la fin de la semaine 2 pour juger de l'ampleur de l'épizootie. Dans le second scénario (scénario 2) par contre, les mesures de recherche active de foyers ont été mises en œuvre rapidement, et le décideur sait qu'à la fin de la seconde semaine, il disposera de suffisamment d'informations pour savoir si l'épizootie va être de grande ampleur (i.e. qui justifie l'utilisation de la vaccination), ou bien de faible ampleur (i.e. pour laquelle l'utilisation de la vaccination n'a pas de fondement économique). On suppose de plus qu'à la fin de cette première semaine d'épizootie, le décideur dispose d'avis d'experts sous la forme d'une probabilité  $p$  (que l'on suppose non biaisée) que l'épizootie va être de grande ampleur.

Dans le premier scénario, du fait que le décideur sait *a priori* que l'incertitude quant à l'ampleur de l'épizootie ne sera pas levée à la fin de la seconde semaine, il est inutile de repousser la prise de décision, et les seules options qui s'offrent au décideur sont de décider d'une campagne de vaccination d'urgence, ou bien de s'en tenir à une stratégie purement sanitaire. La démarche consiste à comparer le coût de l'épizootie si on vaccine à la fin de la première semaine ( $C_2$ ) au coût de l'épizootie si on ne le fait pas ( $C_1$ ), en s'intéressant à la différence  $C = C_1 - C_2$ : le coût du report de la vaccination d'urgence. Si  $C$  est négatif, la décision optimale est de ne pas vacciner, sinon elle est de lancer une vaccination d'urgence.

Si  $C_2$  est aisé à estimer,  $C_1$  l'est moins puisqu'en l'absence de vaccination précoce, il reste possible de pratiquer une vaccination tardive (à la fin de la seconde semaine) et que les deux termes de l'alternative (usage ou pas d'une campagne de vaccination tardive) doivent être pris en compte pour calculer  $C_1$ . La démarche consiste d'abord à estimer un seuil critique pour le taux de dissémination ( $\tau^*$ ) tel que le coût de l'épizootie sera le même, avec ou sans vaccination : si le taux de dissémination de la deuxième semaine ( $\tau$ ) est supérieur à ce seuil, la décision optimale est de vacciner, sinon elle est de ne pas vacciner. Malheureusement, dans le premier scénario, la valeur de  $\tau$  n'est pas connue à la fin de la deuxième semaine, et le décideur ne peut que prendre en compte les informations

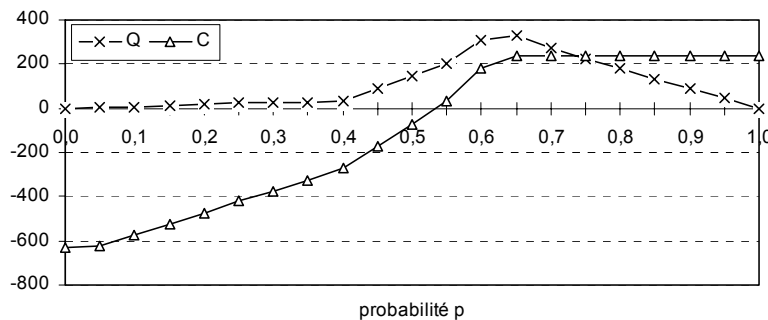
disponibles à ce sujet, modélisées par la probabilité  $p$  d'occurrence d'une épizootie de grande ampleur fournie par les experts. La valeur de  $\tau$  est alors estimée par la moyenne de  $\tau^+$  et de  $\tau^-$ , pondérés respectivement par  $p$  et par  $(1 - p)$  :  $\tau^- = p \tau^+ + (1 - p) \tau^-$ . Finalement,  $C_1$  est calculé de la façon suivante :

- si  $\tau^- > \tau^*$  : le coût de l'épizootie avec une campagne de vaccination débutant à la fin de la seconde semaine
- si  $\tau^- < \tau^*$  : le coût de l'épizootie sans campagne de vaccination.

A titre d'exemple, la figure 5 montre les valeurs que prend  $C$  pour différentes valeurs de  $p$ . On constate que la courbe passe au dessus de zéro pour une valeur de  $p$  approximativement égale à 0,55. Dans ce premier scénario de prise de décision, si à la fin de la première semaine, la probabilité attribuée par les experts à l'occurrence d'une épizootie de grande ampleur dépasse 0,55, il est donc économiquement justifié de lancer immédiatement une campagne de vaccination. Dans le cas contraire, il est préférable de s'en tenir à une stratégie purement sanitaire (figure 6).

FIGURE 5

**Coût (C) associé au report d'une campagne de vaccination d'urgence et gain (Q) associé à ce report, en fonction de la probabilité (p, estimée par les experts) d'occurrence d'une épizootie de grande ampleur**



Dans le second scénario, le décideur sait qu'à la fin de la deuxième semaine, il disposera des informations suffisantes pour savoir si l'épizootie sera de faible ou de grande ampleur, et qu'il pourra donc à ce moment là prendre la décision optimale. Les options qui s'offrent à lui portent sur le report ou pas de la prise de décision : au vu des informations disponibles, est-il préférable de vacciner tout de suite ou peut-on se permettre d'attendre une semaine pour prendre la décision optimale ?

La démarche consiste cette fois à comparer le coût du report de la vaccination d'urgence (C) au gain obtenu grâce à l'acquisition de nouvelles informations (Q). Si Q est inférieur à C, il est préférable de pratiquer une

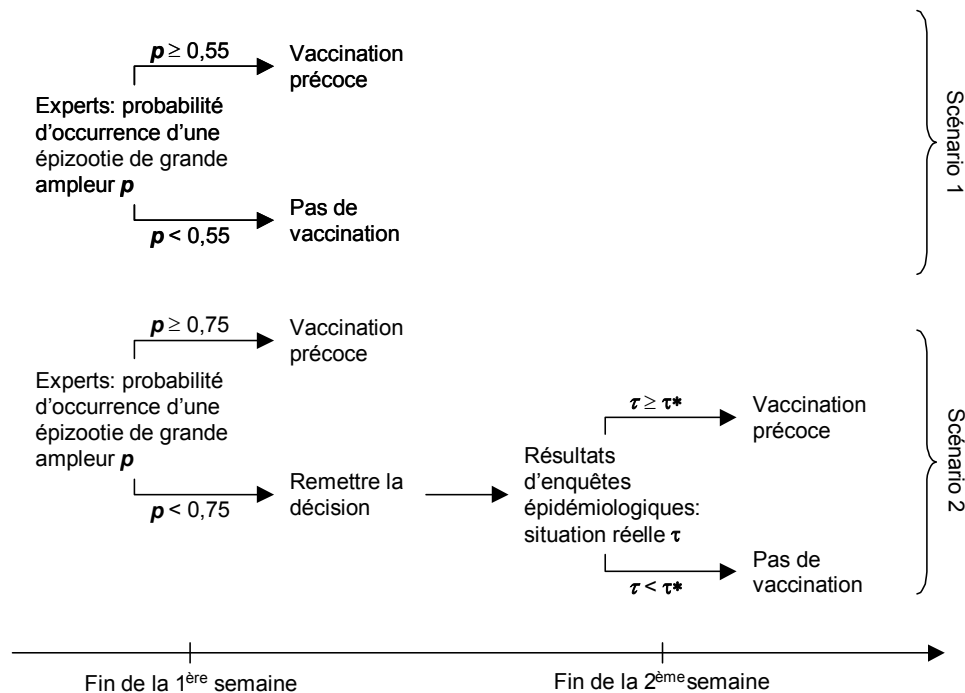
vaccination précoce, alors que si Q est supérieur à C, il vaut mieux attendre la fin de la semaine pour décider (ou pas) d'une vaccination tardive en toute connaissance de cause. Le gain obtenu grâce à l'acquisition de nouvelles informations (Q) est calculé en comparant le coût de l'épizootie si on ne fait pas de vaccination précoce dans deux contextes : sans prendre en compte les informations obtenues au cours de la seconde semaine (il s'agit de  $C_1$  défini plus haut) ou en les prenant en compte ( $C_3$ ). On s'intéresse alors à la différence  $Q = C_1 - C_3$ . Plus précisément, le coût  $C_3$  est la moyenne des coûts de l'épizootie avec et sans vaccination tardive, pondérés respectivement par  $p$  et par  $(1 - p)$ .

FIGURE 6

**Arbres de décision pour le lancement d'une campagne de vaccination d'urgence selon que le décideur sait que l'incertitude sur la situation épidémiologique réelle sera levée (scénario 2) ou pas (scénario 1) à la fin de la deuxième semaine d'épizootie.**

$\tau$ : taux de dissémination de la maladie au cours de la deuxième semaine

$\tau^*$ : seuil de  $\tau$  pour lequel les coûts induits par les stratégies avec et sans vaccination tardive sont identiques



La figure 5 montre pour un exemple les valeurs de  $C$  et de  $Q$  en fonction de  $p$ . On constate que la courbe de  $Q$  passe au dessus de celle de  $C$  pour une valeur de  $p$  approximativement égale à 0,75. Dans ce second scénario de prise de décision, si à la fin de la première semaine, la probabilité attribuée par les experts à l'occurrence d'une épizootie de grande ampleur dépasse 0,75, il est donc économiquement justifié de lancer immédiatement une campagne de vaccination. Dans le cas contraire, il est préférable de remettre la décision à la semaine suivante : si les informations recueillies au cours de la deuxième semaine indiquent une épizootie de grande ampleur, il convient de pratiquer une

campagne de vaccination tardive ; sinon, la décision économiquement optimale consiste à s'en tenir à une stratégie purement sanitaire (figure 6).

En comparant les deux scénarios de prise de décision, il est intéressant de constater que le fait que le décideur sache que l'incertitude quant à la taille de l'épizootie sera levée à la fin de la deuxième semaine lui permet de repousser le seuil de la probabilité d'occurrence d'une épizootie de grande ampleur au dessus duquel une campagne de vaccination précoce est pertinente (d'une valeur de 0,55 à une valeur de 0,75 dans notre exemple).

## IV - DISCUSSION

L'association d'un modèle épidémiologique avec un modèle économique apporte aux décideurs des éléments objectifs pour décider, hors contexte épizootique, d'une stratégie de lutte et l'adapter à différents contextes régionaux. Les deux modèles ont été fournis à la DGAI sous la forme d'un programme informatique. Les résultats obtenus montrent par exemple que la stratégie de lutte sanitaire avec abattage préventif est clairement optimale en Bretagne, alors qu'en PACA, ses performances sont proches de la stratégie de lutte sans abattage préventif. L'approche proposée ne traite que des épizooties mono-centriques. Elle pourrait cependant aisément être étendue à des épizooties multi-centriques.

Ces modèles sont des modèles déterministes : ils ont été conçus pour étudier l'allure moyenne d'une épizootie de FA dans une région donnée, et pour en évaluer les conséquences économiques moyennes. A ce titre, ils permettent également aux décideurs de dimensionner les structures à prévoir pour juguler une épizootie dans différents contextes régionaux. A l'inverse, il est important de souligner que ces modèles ne sont en aucun cas des modèles prédictifs : la dynamique d'une épizootie est en grande partie due au hasard et ces modèles n'ont pas été conçus pour prédire de façon précise la durée et la taille d'une épizootie donnée.

Si l'analyse des coûts d'épizooties moyennes en Bretagne et en PACA amène à exclure l'utilisation d'une stratégie de lutte médico-sanitaire d'emblée, cela ne veut pas dire pour autant que le recours à une campagne de vaccination d'urgence doit systématiquement être exclu des options envisageables. Les résultats montrent que la stratégie optimale dépend étroitement des valeurs effectives des paramètres de transmission de la maladie pour l'épizootie en cours et que la stratégie médico-sanitaire devient optimale lorsque ces paramètres de transmission atteignent des valeurs élevées, que ce soit à cause du contexte démographique (densité d'élevages, espèces présentes) ou d'insuffisances du dispositif de lutte (manque de moyens, de personnel). Ce constat souligne la position délicate des décideurs qui, en cas d'épizootie, ont à choisir entre l'utilisation ou pas de la vaccination d'urgence. Le modèle a été utilisé pour formaliser sur un exemple simple cette prise de décision aux conséquences irréversibles (une campagne de vaccination n'a de sens que si elle est menée jusqu'à son

terme), dans un contexte où les informations disponibles sont incomplètes (la situation épidémiologique) et incertaines (la probabilité d'occurrence d'une épizootie de grande ampleur), et en prenant en compte la connaissance qu'a le décideur du fait que ces incertitudes et imprécisions vont être levées (ou pas) au cours de la semaine suivante. Il serait intéressant de généraliser cette première approche afin de rationaliser cette prise de décision difficile en apportant des éléments objectifs d'aide à la décision.

L'épizootie qui a eu lieu au Royaume-Uni en 2001 s'est soldée par un total de 2 030 foyers et a duré environ 11 mois. Du fait de la découverte tardive du premier foyer et des mouvements d'animaux, cette épizootie s'est révélée d'emblée multi-centrique, et dès les premières semaines, les décideurs avaient connaissance de foyers disséminés dans tout le pays [Gibbens *et al.*, 2001]. On peut penser que dès ces premières semaines, des experts de la fièvre aphteuse auraient pu attribuer une probabilité relativement élevée à l'occurrence d'une épizootie de grande ampleur, ce qui, selon l'approche proposée ici, aurait pu favoriser l'adoption d'une stratégie médico-sanitaire. De nombreux travaux de modélisation ont été consacrés à cette épizootie [Ferguson *et al.*, 2001a et b ; Keeling *et al.*, 2001 ; Kao, 2001 ; Morris *et al.*, 2001], et on peut en trouver une bonne revue dans [Kao, 2002]. Certains de ces travaux ont été utilisés pour justifier la stratégie de lutte adoptée par les autorités britanniques, et notamment le non recours à la vaccination. Il est remarquable de noter que dans aucun de ces travaux, la vaccination n'est donnée comme une alternative valable à la stratégie purement sanitaire, ces résultats se fondant d'ailleurs sur des critères purement épidémiologiques (taille et durée prédite de l'épizootie) et non pas sur des critères économétriques. En analysant ces travaux on constate cependant que le scénario avec vaccination qui a été envisagé par les auteurs était un scénario de vaccination tardive, commençant plusieurs mois après le début de l'épizootie. On conçoit bien que dans ces conditions la vaccination n'apparaisse plus comme une alternative intéressante, et on ne peut que regretter qu'aucune étude ne se soit intéressée (à ce jour) à ce qu'aurait pu être le déroulement de l'épizootie si une campagne de vaccination avait été initiée dès les premières semaines. Le fait qu'aucun de ces

auteurs ne se soit intéressé à une vaccination précoce résulte du contexte (ces modèles ont été conçus pour apporter une aide à la décision à un moment où l'épizootie était déjà largement entamée, il était donc inutile d'envisager un scénario de vaccination précoce) mais aussi de la méthodologie de modélisation. Dans tous ces modèles, les paramètres de transmission ont été estimés à partir de données de terrain, produites par les enquêtes épidémiologiques et centralisées dans une base de données. Pour pouvoir estimer ces paramètres avec une précision acceptable, il est bien sûr nécessaire de disposer de suffisamment de données, et donc de laisser évoluer l'épizootie... On voit donc que ce type d'approche ne permet pas d'apporter une aide à la décision précoce, alors que c'est justement de façon précoce qu'une campagne de vaccination d'urgence doit être décidée. Ceci souligne l'intérêt d'approches mécanistes analogues à celle que nous avons utilisée, dans lesquelles les macro-paramètres de transmission (tels que les taux de dissémination), par définition spécifiques d'une épizootie donnée, ne sont pas estimés à

partir de données de terrain (produites par les enquêtes épidémiologiques) mais plutôt à partir de modèles micro-analytiques dont les paramètres portent sur les mécanismes élémentaires de transmission.

Pour finir, il faut souligner que si l'approche économique est une manière commode (et aisément compréhensible par tous) de comptabiliser les conséquences d'une épizootie de FA, elle ne permet pas de capturer toutes les composantes de ces conséquences. Ainsi, on peut penser qu'au delà des chiffres, l'épizootie britannique de 2001 va profondément et durablement modifier le paysage agricole anglais du fait du changement d'activité de nombreux éleveurs dont le troupeau a été abattu. Ce type de conséquences sur le long terme est certainement plus difficile à modéliser ; on peut cependant souhaiter qu'à l'avenir, des équipes pluri-disciplinaires tentent de les intégrer dans des modélisations des conséquences d'épizooties de FA (ou d'une autre maladie), afin d'apporter aux décideurs des éléments objectifs autres que purement économétriques.

## BIBLIOGRAPHIE

- Durand B. ~ Simulation multi-agents et épidémiologie opérationnelle : étude d'épizooties de fièvre aphteuse. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen, 1996, 330 pp.
- Durand B. et Mahul O. ~ An extended state-transition model for foot-and-mouth disease epidemics in France. *Preventive Veterinary Medicine*, 2000, **47**: 121-139.
- Ferguson NM., Donnelly C.A., Anderson R.M. ~ Transmission intensity and impact of control policies on the foot-and-mouth epidemic in Great Britain. *Nature*, 2001a, **413**: 542-548.
- Ferguson NM., Donnelly C.A., Anderson R.M. ~ The foot-and-mouth epidemic in Great Britain: pattern of spread and impact of interventions. *Science*, 2001b, **292**: 1155-1160.
- Gibbens J.C., Sharpe C.E., Wilesmith J.W., Mansley L.M., Michalopoulou E., Ryan J.B.M., Hudson M. ~ Descriptive epidemiology of foot-and-mouth disease epidemic in Great Britain : the five first months. *The Veterinary Record*, 2001, **149**: 729-743.
- Kao R.R. ~ Landscape fragmentation and foot-and-mouth disease transmission. *The Veterinary Record*, 2001, **148**: 745-747.
- Kao R.R. ~ The role of mathematical modelling on the control of the 2001 FMD epidemic in the UK. *Trends in Microbiology*, 2002, **10**(6): 279-286.
- Keeling M.J., Woolhouse M.E.J., Shaw D.J., Matthews L., Chase-Topping M., Haydon D.T., Cornell S.J., Kappey J., Wilesmith J., Grenfell B.T. ~ Dynamics of the foot-and-mouth epidemic : stochastic dispersal in a heterogeneous landscape. *Science*, 2001, **294**: 813-817.
- Leforban Y. ~ L'épisode de fièvre aphteuse en Europe en 2001 était-il prévisible ? La vaccination constitue-t-elle une solution ? *Revue Scientifique et Technique de l'Office International des Epizooties*, 2002, **21**(3): sous presse.
- Mahul O. et Durand B. ~ Simulated economic consequences of foot-and-mouth disease epidemics and their public control in

France. *Preventive Veterinary Medicine*, 2000, **47**: 23-38.

Mahul O. et Gohin A. ~ Irreversible decision making in contagious animal disease control under uncertainty : an illustration using FMD in Brittany. *European Review of Agricultural Economics*, 1999, **26**(1): 39-58.

Miller W.M. ~ A state-transition model of epidemic foot-and-mouth disease. In : Ellis

P.R., Shaw A.P.M. et Stephens A.J. (eds), *New techniques in veterinary epidemiology and economy*. ISVEE, Reading, Juillet 1976: 51-67.

Morris R.S., Wilesmith J.W., Stern M.W., Sanson R.L., Stevenson M.A. ~ Predictive spatial modelling of alternative control strategies for the foot-and-mouth disease epidemic in Great-Britain, 2001. *The Veterinary Record*, 2001, **149**: 137-144.

