

IMPACT DE L'ÉVOLUTION DE LA STRUCTURE DES ÉLEVAGES SUR LA TUBERCULOSE BOVINE EN FRANCE ENTRE LES ANNÉES 1965 ET 2000 *

Mohammed El Amine Bekara¹, Lamiae Azizi², Jean-Jacques Bénét³ et Benoît Durand¹

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est de décrire l'évolution de la distribution de la tuberculose bovine en France, dans le temps et dans l'espace entre 1965 et 2000 et d'étudier la relation entre cette évolution et l'évolution des structures et des pratiques d'élevage, parallèlement à celle des mesures de détection et de contrôle. Un modèle spatio-temporel hiérarchique Bayésien a été utilisé pour réaliser cette étude. Les résultats montrent l'existence d'un sur-risque dans la partie sud de la France pendant la période d'étude. Quatre facteurs ont été associés à un risque élevé d'incidence de la tuberculose bovine : la taille des élevages, le pourcentage de la surface toujours en herbe dans la surface agricole utilisée dans le département, la densité d'élevages bovins et le pourcentage des vaches laitières. Ces résultats suggèrent que la professionnalisation et la spécialisation des élevages bovins ont joué un rôle dans la réduction du risque de la tuberculose bovine en France entre 1965 et 2000.

Mots-clés : tuberculose bovine, spatio-temporel, Bayésien, professionnalisation, spatialisation.

SUMMARY

We analyzed the spatio-temporal variations in bovine tuberculosis (bTB) incidence between 1965 and 2000 in France at the department level. Using a Bayesian space-time model, we studied the association between changes in bTB incidence and changes in structure of the cattle population and in herd management practices. Southern France remained a high risk area over the period analyzed. Four factors were found to be associated with an increase in the risk of bTB: average herd density and size, percentage of dairy cows in the cattle population, and percentage of permanent grassland in cultivated areas. Our results suggest that, besides mandatory detection and control procedures, other trends (professionalization and specialization) played a significant role in reducing the risk of bTB in France between 1965 and 2000.

Keywords: Bovine tuberculosis, Spatio-temporal, Bayésien, Professionalization, Specialization.



* Texte de la conférence présentée au cours de la Journée scientifique AEEMA-RFSA, 18 mars 2014

¹ Université Paris-Est, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), laboratoire de santé animale, unité EPI, Maisons-Alfort, France

² Unité d'épidémiologie animale, INRA Clermont-Ferrand-Theix/MRC Biostatistics Unit Cambridge, UK

³ Université Paris-Est, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort (ENVA), unité EPIMai Maisons-Alfort, France

I - INTRODUCTION

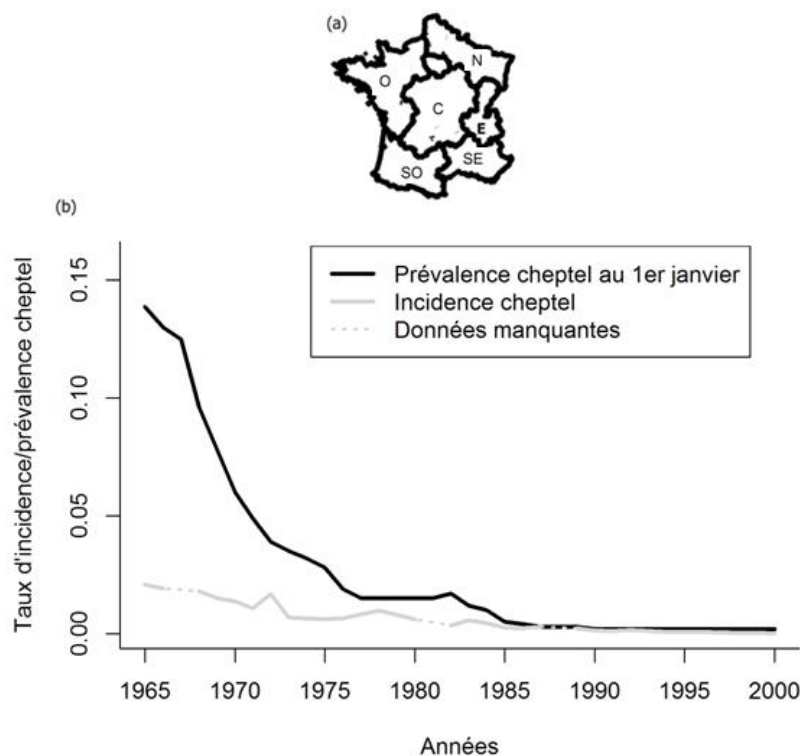
En France, la lutte collective contre la tuberculose bovine, après une phase fondée sur le volontariat des éleveurs entamée dès 1933, n'a véritablement commencé qu'en 1954. La prophylaxie est devenue obligatoire à partir de 1965 sur l'ensemble du territoire Français (AM 23/06/1965). Elle a abouti en 2001 à la reconnaissance de la France comme pays officiellement indemne de tuberculose bovine (taux de prévalence cheptel <0,1 %) par l'Union Européenne (2001/26/CE) [Bénet *et al.*, 2006]. Le

taux de prévalence instantanée de niveau cheptel (au 31 décembre) est passé d'environ 13 % en 1965 à 1,5 % en 1980, pour atteindre moins de 0,1 % en 2000 (figure 1b) [Bénet *et al.*, 2006]. La diminution de ce taux a été rapide entre 1965 et 1980, puis plus lente après 1980 (figure 1b). Cette évolution n'a cependant pas été homogène sur le territoire et la diminution du taux de prévalence instantanée a été plus rapide dans certains départements que dans d'autres.

Figure 1

Évolution du taux d'incidence et de prévalence cheptel de la tuberculose bovine entre 1965 et 2000 ;

(a) définition des six zones homogènes pour les caractéristiques de l'élevage bovin (adapté de Pulvinage [Pluvinage, 1971]) ;
(b) évolution du taux d'incidence et de prévalence.



Depuis sa mise en place, en 1965, le plan de prophylaxie a été fondé sur une détection des cheptels infectés par dépistage des animaux infectés à l'aide du test d'intradermo-tuberculation (IDT), et par l'inspection systématique des carcasses à l'abattoir en vue de la recherche de lésions tuberculeuses. L'assainissement des cheptels reconnus infectés a été fondé sur la détection des animaux infectés, par IDT, en vue de leur élimination. A partir de

1990, le plan de lutte a été renforcé par une mesure importante visant à protéger les élevages indemnes : le contrôle sanitaire obligatoire par IDT des animaux introduits dans les élevages indemnes, ces animaux ne pouvant provenir que d'élevages eux-mêmes indemnes, et des sanctions administratives (de restriction des mouvements des animaux) étant appliquées en cas de non-respect de cette mesure. A partir de 1999, et à la suite de la diminution de la prévalence de la

tuberculose, l'abattage total des bovins dans les élevages déclarés infectés a été introduit dans le plan de prophylaxie. Depuis 1965, bien que le plan de prophylaxie soit resté identique dans tous les départements, le rythme de dépistage par IDT a été adapté en fonction de la prévalence cheptel observée dans le département. De façon similaire, bien que les cheptels infectés doivent être soumis à un abattage total depuis 1999, une dérogation à cette règle a été appliquée à partir de 2009 dans les départements de la Côte-d'Or et de la Dordogne.

Depuis les années 1950, l'élevage bovin en France a connu plusieurs évolutions. Entre 1950 et 1980, le type d'élevage dominant était laitier, avec des structures traditionnelles de type familial, caractérisées par une taille de cheptel relativement faible. A partir de 1980, le type d'élevage laitier a régressé (de façon plus marquée après 1984), parallèlement à une progression des élevages de type allaitant. Cette double évolution a découlé de la politique européenne de limitation de la production laitière (via la mise en place de quotas laitiers) et de soutien au cheptel allaitant. En parallèle, le nombre d'exploitations bovines a diminué de trois quarts entre 1965 et 2000, alors que le nombre total de bovins restait inchangé : la taille moyenne des cheptels a donc fortement augmenté.

Le statut d'un cheptel vis-à-vis de la tuberculose bovine est fortement associé aux pratiques d'élevage : dans une étude réalisée par Munyeme *et al.*, [2008] en Zambie, les élevages transhumants présentaient un risque plus élevé d'être infectés par la tuberculose bovine que les élevages en stabulation (OR = 3 [1,1 - 8,6]) [Munyeme *et al.*, 2008]. En Belgique, Humblet *et al.* [2010] ont analysé tous les isolats des bovins appartenant aux foyers déclarés infectés par la tuberculose bovine entre 1995 et 2006 (n=415). Ils ont trouvé que la densité en bovins était un facteur de risque d'infection des cheptels par la tuberculose bovine [Humblet *et al.*, 2010]. Dans plusieurs études le type d'élevage laitier était un facteur de risque de la tuberculose bovine par rapport aux autres types d'élevages allaitants/mixtes [Alvarez *et al.*, 2012 ;

Karolemeas *et al.*, 2011 ; Ramirez-Villaescusa *et al.*, 2010 ; Vial *et al.*, 2011]. La taille des élevages est également identifiée comme un facteur de risque de niveau cheptel dans plusieurs études [Brooks-Pollock et Keeling, 2009 ; Carrique-Mas *et al.*, 2008 ; Green et Cornell, 2005 ; Griffin *et al.*, 1996 ; Munroe *et al.*, 1999 ; Ramirez-Villaescusa *et al.*, 2010 ; Reilly et Courtenay, 2007 ; Wolfe *et al.*, 2010]. Plusieurs auteurs ont trouvé une association entre le statut de cheptel vis-à-vis de la tuberculose et les mouvements de bovins dans les zones infectées [Gilbert *et al.*, 2005]. L'historique de l'infection, dans l'élevage ou dans la région, est aussi identifiée comme un facteur de risque d'infection par la tuberculose bovine dans plusieurs études [Carrique-Mas *et al.*, 2008 ; Humblet *et al.*, 2010 ; Karolemeas *et al.*, 2011 ; Olea-Popelka *et al.*, 2004].

On a donc assisté, entre 1950 et 2000, à des changements en parallèle des pratiques d'élevage (avec une disparition des élevages familiaux et une professionnalisation du métier d'éleveur), des structures d'élevage (avec des changements de type et de taille d'élevage), de l'allure de la maladie (avec une diminution de l'incidence de la tuberculose, plus ou moins rapide selon les départements) et des plans de prophylaxie (progressivement adaptés, dans chaque département, à l'évolution de la maladie). On peut donc penser que, si l'évolution favorable de la prévalence de la tuberculose bovine en France depuis les années 1950 est imputable à l'efficacité des plans de lutte, elle est également en partie liée aux changements profonds de structures et de pratiques d'élevage au cours de cette période.

L'objectif de ce travail est d'analyser les variations spatiales et temporelles de l'incidence de la tuberculose bovine en France entre la mise en place d'un plan de prophylaxie obligatoire (en 1965) et l'obtention du statut indemne (en 2000) afin : (i) de mettre en évidence des zones à risque élevé ou faible au cours de la période d'étude, et (ii) d'étudier l'association entre l'évolution de l'incidence de la maladie et celle des structures et des pratiques d'élevage.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. SOURCE DE DONNÉES

1.1. INCIDENCE DE LA TUBERCULOSE

Le nombre des nouveaux cheptels déclarés infectés chaque année a été obtenu à partir des rapports annuels de lutte anti-tuberculose de la DGAL (ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la forêt). Les données d'incidence cheptel ont ainsi pu être obtenues pour la période 1965-2000, à l'exception de trois années (1967, 1981, 1988) pour lesquelles le rapport annuel de lutte anti-tuberculose n'a pas pu être obtenu pour des raisons inconnues.

1.2. RYTHME DE LA PROPHYLAXIE

Le rythme de la prophylaxie est la fréquence d'application de l'IDT dans un département. Il peut être annuel, biennal, triennal ou quadriennal. Le dépistage peut également être arrêté. Il a été obtenu à partir des rapports annuels de lutte anti-tuberculose de la DGAL (ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la forêt) pour la période 1989-2000. Pour la période 1965-1988, nous avons fixé le rythme de prophylaxie en fonction de la réglementation européenne (UE/64/432) en vigueur, mise en œuvre par le ministère de l'agriculture. Cette réglementation fixe les règles de passage d'un rythme à l'autre selon la prévalence observée :

- Le rythme annuel devient biennal si le taux de prévalence cheptel dans le département est inférieur à 1 % durant deux ans ;
- Le rythme devient triennal si le taux de prévalence cheptel dans le département est inférieur à 0,2 % durant quatre ans ;
- Le rythme devient quadriennal (ou le dépistage peut aussi être arrêté) si le taux de prévalence cheptel dans le département est inférieur à 0,1 % durant six ans.

1.3. STRUCTURES ET PRATIQUES D'ÉLEVAGE

La surface toujours en herbe, la surface agricole utilisée, le nombre total des bovins, le nombre total des vaches laitières et le nombre total des cheptels dans le département ont été obtenus à partir des rapports de statistique agricole annuelle et de recensement général agricole (1970, 1979, 1988 et 2000) auprès du service AGRESTE

(ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la forêt).

2. MODÈLE

2.1. MODÈLE SPATIO-TEMPOREL HIÉRARCHIQUE BAYÉSIEN

Afin de mettre en évidence les régions à risque anormalement élevé et d'étudier l'effet des mesures de lutte et des pratiques d'élevage sur l'évolution de la tuberculose, nous avons utilisé un modèle spatio-temporel hiérarchique bayésien qui permet d'estimer l'incidence cheptel annuelle par département de la tuberculose bovine en prenant en compte un ensemble de variables disponibles pour chaque année de la période d'étude et jugées pertinentes : le pourcentage des vaches laitières « PVL », le pourcentage de surface toujours en herbe dans la surface agricole utilisée « PSTH », la taille moyenne des élevages « TM » et la densité de cheptels « DCH » (cheptels /km²).

Le modèle utilisé dans cette étude est une extension du modèle spatial hiérarchique bayésien proposé par Besag, York et Mollié [Besag *et al.*, 1991]. Ce modèle spatial est largement utilisé car il permet d'améliorer les estimations de l'incidence obtenues par le SIR (taux d'incidence standardisé) [Lawson *et al.*, 2003], qui est l'estimateur du maximum de vraisemblance du risque obtenu par le ratio du nombre de nouveaux cheptels infectés Y_i dans le département i et le nombre de cas attendus E_i (produit du taux d'incidence national et la taille d'élevage dans le département i), en prenant en compte la corrélation spatiale et temporelle entre les unités géographiques.

Les données dont on dispose sont Y_{it} , le nombre de cas infectés et E_{it} , le nombre de cas attendus pour chaque département $i = 1, \dots, N$ et chaque période $t = 1, \dots, T$. Au premier niveau de la hiérarchie de notre modèle, on suppose que :

$$Y_{it} \sim \text{Poisson}(E_{it}\lambda_{it}),$$

avec λ_{it} est le risque relatif (RR) dans le département i et période t que l'on cherche à modéliser, ce RR correspond au ratio d'incidence standardisé (SIR) dans ce département pour cette période. Le deuxième niveau de la hiérarchie de notre modèle se présente dans sa forme générale comme suit :

$$\log(\lambda_{it}) = \alpha + \mu_i + \nu_i + \gamma_t + \zeta_{it} + \sum_{\kappa=1}^K \beta_{\kappa} X_{it\kappa}$$

avec :

- α est l'intercept du modèle,
- $X_{it\kappa}$ représentent les K variables d'intérêt, et β_{κ} sont les coefficients qui leurs sont associés.
- μ_i est l'effet aléatoire spatial du département i .
- ν_i est l'effet aléatoire décrivant l'hétérogénéité spatiale non structurée du département i .
- γ_t est l'effet aléatoire temporel de la période t .
- ζ_{it} est l'effet aléatoire de l'interaction spatio-temporelle dans le département i et période t .

Les deux effets aléatoires spatiaux μ_i et ν_i sont considérés comme des variables latentes capturant les effets des facteurs de risque inconnus ou non mesurés, spatialement structurés (μ_i) ou non (ν_i). De même, l'effet aléatoire temporel γ_t représente une variable latente qui capture les variations temporelles de risque relatif dues à des facteurs de risque inconnus ou non mesurés sur toute la zone d'étude. L'interaction spatio-temporelle ζ_{it} capte tout écart de prédiction de risque relatif par rapport à l'évolution spatiale et temporelle de SIR.

La composante d'hétérogénéité non structurée est supposée suivre une loi normale définie par :

$$\nu_i \sim N(0, \sigma_{\nu}^2),$$

Où σ_{ν}^2 contrôle la variabilité de l'incidence dans sa composante spatiale non structurée.

La composante d'hétérogénéité spatialement structurée μ_i suppose que les unités géographiques spatiales proches ont tendance à avoir une incidence similaire. Le modèle gaussien autorégressif conditionnel (CAR) [Kunsch, 1987] intrinsèque, permet de prendre en compte cette hypothèse avec :

$$p(u_i | u_j, j \neq i) \sim N\left(\frac{\sum_{j \neq i} w_{ij} \mu_j}{\sum_{j \neq i} w_{ij}}, \frac{\sigma_{\mu}^2}{\sum_{j \neq i} w_{ij}}\right)$$

où les poids w_{ij} décrivent la proximité des unités i et j et σ_{μ}^2 contrôle la variabilité conditionnelle de l'incidence dans sa composante spatiale. Le critère de proximité géographique le plus utilisé en épidémiologie est celui d'adjacence. Les unités i et j sont voisines si elles partagent une frontière commune :

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si les unités } i \text{ et } j \text{ sont voisines} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Pour l'effet aléatoire temporel γ_t , le modèle CAR a été utilisé :

$$p(\gamma_t | \gamma_d, d \neq t) \sim N\left(\frac{\sum_{d \neq t} Z_{td} \gamma_d}{\sum_{d \neq t} Z_{td}}, \frac{\sigma_{\gamma}^2}{\sum_{d \neq t} Z_{td}}\right)$$

Avec $Z = (z_{td})$ est la matrice d'adjacence temporelle, où $z_{td} = 1$ si t et d sont voisins, sinon $z_{td} = 0$. Dans ce travail, nous avons utilisé le système de voisinage de 1^{er} ordre, dans lequel les périodes $t-1$ et $t+1$ sont considérées comme voisines de la période t . σ_{γ}^2 contrôle la variabilité de l'incidence dans sa composante temporelle.

Dans notre modèle, nous avons utilisé l'approche proposée par Abellan *et al.* [2008] pour modéliser l'interaction spatio-temporelle. L'interaction spatio-temporelle est généralement supposée faible. Cependant, des écarts à cette règle sont possibles. Cela nous a conduit à utiliser un modèle de mélange avec deux composants pour la distribution de ζ_{it} [Abellan *et al.*, 2008] :

$$\zeta_{it} \sim \pi N(0, \sigma_1^2) + (1 - \pi) N(0, \sigma_2^2)$$

Les deux composants ont des distributions gaussiennes de moyenne 0 et de variance σ_1^2 et σ_2^2 , respectivement, où la variance σ_1^2 est supposée être petite. Pour assurer l'identification de ces deux composants, nous avons utilisé la paramétrisation proposée par Robert [Robert, 2007], selon laquelle $\sigma_2^2 = \sigma_1^2 + k$ [Robert, 2007].

2.2. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE

A cause du nombre faible ou nul d'élevages déclarés infectés dans certains départements pour certaines années (en particulier à partir de 1990), nous avons agrégé les données en sept périodes correspondant chacune au moyenne à cinq années de données successives : 1965-1970, 1971-1974, 1975-1978, 1979-1984, 1985-1990, 1991-1995 et 1996-2000 (tableau 1).

Toutes les variables quantitatives (PSTH, TM, DCH et PVL) ont été standardisées. Pour quantifier l'effet de ces variables sur l'incidence cheptel de la tuberculose bovine, nous avons utilisé une différence d'un écart-type.

Le rythme de dépistage par IDT a été intégré sous la forme d'une variable qualitative à trois classes :

- « RA » : rythme annuel ;
- « RB » : rythme biennal (référence) ;
- « RM » : rythme allégé : triennal, quadriennal, mixte (plusieurs rythmes différents au cours de la période) ou arrêt du dépistage.

Tableau 1
Évolution, à l'échelle nationale, du taux d'incidence cheptel, du rythme de prophylaxie et des indicateurs de structures et de pratiques d'élevage

	1965-1970	1971-1974	1975-1978	1979-1984	1985-1990	1991-1995	1996-2000
Surface toujours en herbe(%)	41,21 %	41,88 %	40,54 %	39,89 %	38,54 %	37,07 %	35,78 %
Pourcentage des vaches laitières parmi les bovins	38,96 %	37,64 %	36,91 %	30,23 %	26,97 %	23,01 %	21,55 %
Densité de cheptels (cheptels/ km ²)	2,28	1,81	1,55	1,31	1,04	0,78	0,62
Taille moyenne des cheptels	17,37	23,43	28,53	31,71	39,58	48,80	60,21
Rythme de prophylaxie (nombre des départements) :							
Arrêté ou quadriennal	1	1	2	2	0	1	8
Annuel	94	86	74	69	35	23	13
Biennal	0	4	13	24	52	48	38
Triennal	0	0	0	0	7	23	36
Mixte	1	5	7	1	2	0	0
Taux d'incidence cheptel	0,0175	0,01035	0,00765	0,00519	0,00233	0,00109	0,000473
Taux de prévalence cheptel instantanée (1 ^{er} Janvier)	0,0718	0,0236	0,0149	0,0108	0,0043	0,0016	0,00053

Dans un contexte bayésien, les paramètres sont traités comme des variables aléatoires, donc les connaissances préalables dans la littérature sur les valeurs de ces paramètres peuvent être incorporées par les distributions *a priori*. Spécifiquement, nous avons utilisé une distribution uniforme non informative pour les effets fixes α , β . La distribution *a priori* choisie pour π est loi uniforme sur l'intervalle [0,1]. Nous avons choisi d'assigner la loi Gamma inverse de paramètres 0,5 et 0,0005 comme dans [Kelsall et Wakefield, 1999] pour les écart types suivants : σ_μ , σ_v and σ_γ .

Des distributions demi-normales ont été utilisées pour σ_1 et k comme dans [Abellan *et al.*, 2008] :

$$\sigma_1 \sim N(0, 0.01)I_{(0,+\infty)}$$

$$k \sim N(0, 100)I_{(0,+\infty)}$$

On a utilisé le Logiciel Winbugs [Lunn *et al.*, 2009 ; Lunn *et al.*, 2000] pour obtenir la distribution *a posteriori* des paramètres de notre modèle spatio-temporel.

2.3. EXPLOITATION DU MODÈLE

Pour chaque département, nous avons calculé une note variant de 0 à 7 correspondant au nombre de

périodes pour lesquelles le département était prédit à risque ($\lambda_{it} > 1$) par le modèle.

La cartographie des SIR et celle des variables explicatives a utilisé le découpage proposé par Pluvinage [Pluvinage, 1971], légèrement modifié pour prendre en compte l'évolution de la situation agricole dans certains départements depuis les années 1970. Ce découpage regroupe les départements français en six grandes zones (figure 1a) présentant des caractéristiques relativement homogènes pour l'élevage bovin :

Zone N (Nord) : les élevages bovins présents dans la zone sont surtout des élevages laitiers situés en plaine.

Zone E (Est) : c'est une zone à production laitière de montagnes. La production de viande est limitée à des veaux de boucherie légers et aux vaches de réforme.

Zone C (Centre) : elle est constituée par le Massif central et les régions qui le bordent au nord. C'est une région spécialisée dans la production de viande et les vaches sont essentiellement des vaches allaitantes.

Zone SE (Sud-est) : l'élevage bovin y est peu développé, étant donné le climat méditerranéen

peu propice à la production fourragère. Cette zone contient la région de Camargue (départements : 13, 30 et 34) qui héberge un type d'élevage extensif spécifique : l'élevage de taureaux de combat.

Zone SO (Sud-ouest) : l'élevage bovin n'a pas ici une importance primordiale mais la densité du cheptel n'est cependant pas négligeable. Le type d'élevage se partage presque également entre laitier et allaitant.

Zone O (Ouest) : c'est la première région laitière en France et également la première région productrice de viande (veaux de boucherie et les vaches réformées) bien que les vaches soient ici essentiellement des vaches laitières.

Les cartes ont été tracées avec le logiciel Quantum Gis (Version 1.7.4).

III - RÉSULTATS

1. ANALYSE DESCRIPTIVE

1.1. ÉVOLUTION DE L'INCIDENCE CHEPTEL

Le taux d'incidence cheptel national a diminué au cours du temps, rapidement entre 1965 et 1983, et plus lentement à partir de 1983 (figure 1b). Le taux d'incidence est resté ensuite à peu près stable à partir de 1990 (figure 1b).

1.2. DENSITÉ CHEPTEL

À l'échelle nationale, la densité cheptel a fortement diminué au cours du temps, puisqu'elle est passée de 2,28 cheptels par km² pour période 1 (1965-1970) à 0,62 cheptels par km² pour la période 7 (1996-2000) (tableau 1). Au niveau régional, la zone O a présenté la densité cheptel la plus élevée tout au long de la période d'étude, tandis que la densité cheptel la plus faible était observée dans la zone SE (figure 2a). De plus, l'allure de la diminution de la densité cheptel a été presque similaire dans toutes les zones (décroissance rapide) (figure 2a).

1.3. TAILLE MOYENNE DES ÉLEVAGES

Contrairement à la densité cheptel, la taille moyenne des élevages a augmenté considérablement au cours du temps puisqu'elle a été multipliée par 3,5 entre la période 1 (1965-1970) et la période 7 (1996-2000) (tableau 1). Au niveau régional (figure 2c), au cours de la première période, la taille moyenne des élevages était inférieure ou égale à 20 bovins dans la plupart des départements. Mais par la suite elle n'a pas cessé

de croître de façon assez homogène dans les différentes zones (figure 2c), pour dépasser 70 bovins par élevage en 2000 dans certaines zones, les tailles moyennes les plus élevées étant observées dans la zone N, et les plus faibles dans la zone SE (figure 2c).

1.4. POURCENTAGE DE VACHES LAITIÈRES

Le pourcentage de vaches laitières a diminué au cours du temps (tableau 1). A l'échelle régionale, entre les périodes 1 (1965-1970) et 3 (1975-1978) le pourcentage le plus élevé de vaches laitière était observé dans trois zones O, N et E (figure 2b). A partir de la période 4 (1979-1984), et suite à l'application du système de quotas laitiers, on observe une diminution du pourcentage de vaches laitières dans toutes les zones (figure 2b).

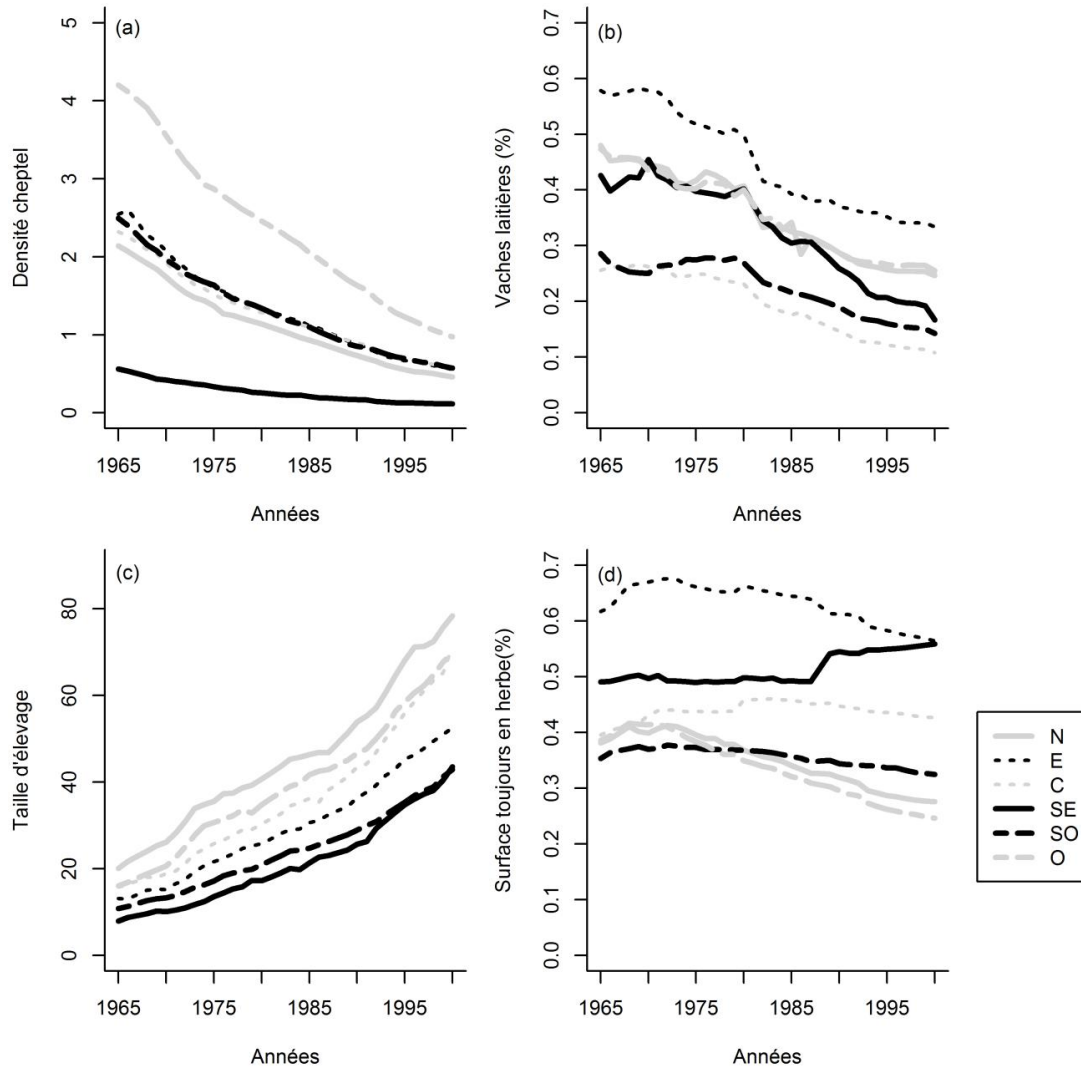
1.5. POURCENTAGE DE STH DANS LA SAU (PSTH)

À l'échelle nationale cette variable a diminué lentement au cours du temps (tableau 1). A l'échelle régionale, durant la période 1 (1965-1970), deux zones présentaient des valeurs élevées : les zones E et SE (figure 2d). Durant les périodes 2 (1971-1974) et 3 (1975-1978) cette variable a conservé des valeurs stables dans les différentes zone, sauf dans les zones N et O où elle a commencé à diminuer (figure 2d). A partir de la période 4 (1979-1984) jusqu'à la période 7 (1996-2000), le pourcentage de STH dans la SAU a diminué dans toutes les zones sauf dans la zone SE où il a continué à progresser (figure 2d).

Figure 2

Évolution, entre 1965 et 2000, de :

- (a) la densité d'élevage par Km² ; (b) la proportion de vaches laitières dans la population totale ;
 (c) la taille moyenne des élevages ; (d) la proportion de surface toujours en herbe dans la surface agricole utilisée.



1.6. RYTHME DE PROPHYLAXIE

Entre les périodes 1 et 6 (1965-1995), moins de 2 % des départements avaient un rythme de prophylaxie quadriennal ou arrêté. Par contre, à partir de 1996 (période 7) ce pourcentage a augmenté pour atteindre 8,4 %. Parallèlement, le pourcentage des départements qui avaient un rythme annuel est resté supérieur à 70 % jusqu'en 1984 et a diminué ensuite progressivement pour atteindre 13,54 % durant la dernière période (1996-2000) (tableau 1).

2. MODÈLE SPATIO-TEMPOREL BAYÉSIEN HIÉRARCHIQUE

Un SIR significativement plus élevé a été associé au rythme de prophylaxie annuel, par rapport au rythme de prophylaxie biennal (ratio d'incidence [IR] = 1,13, intervalle de crédibilité [IC] à 95 % : [1,02 - 1,26]) (tableau 2). Aucune différence significative d'incidence n'a par contre été associée aux rythmes de prophylaxie allégé (triennal ou quadriennal), mixte ou arrêté (tableau 2).

Tableau 2
Médiane et intervalle de crédibilité à 95 % de la distribution a posteriori des différents paramètres du modèle

Variable	Médiane	Intervalle de crédibilité à 95 %
Surface toujours en herbe (%)	1,03 ^a	[1,001-1,13]
Taille moyenne des élevages	1,15 ^b	[1,01-1,40]
Densité cheptel (Cheptels/ Km2)	1,02 ^c	[1,0005-1,08]
Vaches laitières (% dans la population totale)	1,02 ^d	[1,001-1,09]
Fréquence de dépistage :		
Biennal	<i>ref</i>	-
Annuel	1,13 ^e	[1,02-1,26]
Autre	0,98 ^e	[0,96-1,05]
Autocorrélation temporelle:		
1965-1970	0,09	[-0,08 ; 0,46]
1971-1974	-0,15	[-0,27 ; -0,04]
1975-1978	-0,004	[-0,09 ; 0,10]
1979-1984	0,10	[0,02 ; 0,18]
1985-1990	0,09	[0,0002 ; 0,18]
1991-1995	-0,02	[-0,15 ; 0,11]
1996-2000	-0,10	[-0,32 ; 0,085]
σ_{γ}^2	0,029	[0,005 ; 0,10]
σ_u^2	0,53	[0,27 ; 0,91]
σ_v^2	0,10	[0,021 ; 0,227]
σ_1^2	0,409	[0,36 ; 0,45]
σ_2^2	3,32	[1,47 ; 7,63]

^aRatio d'incidence estimé pour une augmentation de 24 % (écart-type de la variable). ^b Ratio d'incidence estimé pour une augmentation de la taille des élevages de 19,2 bovins (écart-type de la variable). ^c Ratio d'incidence estimé pour une augmentation de la densité cheptel de 1,3 élevages/km² (écart-type de la variable). ^dRatio d'incidence estimé pour une augmentation de 16 % de pourcentage de vaches laitières. ^eRatio d'incidence.

L'augmentation de la taille moyenne des élevages a été associée à un SIR significativement élevé avec un IR de 1,15 pour une augmentation d'un écart-type de la taille moyenne des cheptels bovins (19 bovins) (IC 95 % : [1,01-1,40]) (tableau 2). De même, l'augmentation du pourcentage de la surface toujours en herbe dans la surface agricole utilisée est un facteur de risque de l'augmentation de l'incidence cheptel de la tuberculose bovine, avec un IR de 1,03 pour une augmentation d'un écart-type (24 %) (IC 95 % : [1,001-1,13]) (tableau 2). Une augmentation de la densité des

cheptels dans le département a été associée à un SIR significativement plus élevé, avec un IR de 1,02 pour une augmentation d'un écart-type (1,3 cheptels/km²) (IC 95 % : [1,0005-1,08]) (tableau 2). De même, un effet aggravant a été associé au pourcentage de vaches laitières dans la population totale des bovins, avec un IR de 1,02 pour une augmentation d'un écart-type (16 %) (IC 95 % [1,001-1,09]) (tableau 2).

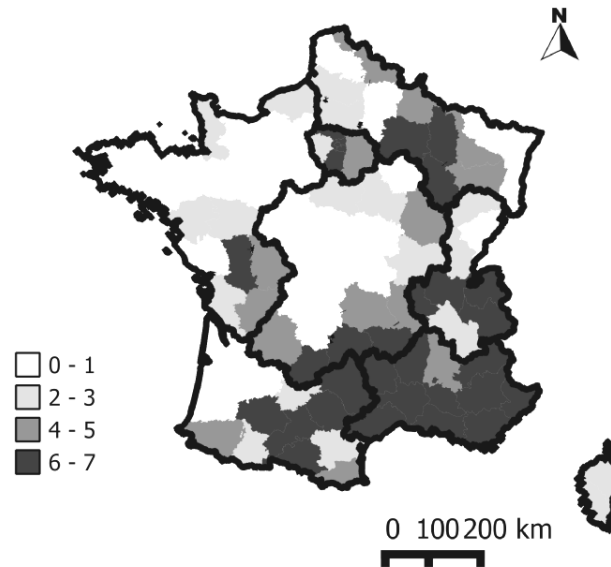
L'autocorrélation temporelle γ_t ne montre aucune tendance claire, avec des valeurs positives ou négatives, au cours du temps (tableau 2).

La figure 3 présente la distribution des départements selon le nombre de périodes où le département a été prédit à risque par le modèle M2 ($\lambda_{it} > 1$). Les zones E (partie sud-est), SE, SO et C (pour les départements frontaliers des zones SE et

SO) étaient des zones à risque élevé ($\lambda_{it} > 1$ pour 6 ou 7 des 7 périodes). Inversement, les zones C (parties nord et centre) et O (partie nord) étaient des régions à risque faible ($\lambda_{it} > 1$ au maximum une fois sur les 7 périodes).

Figure 3

Distribution des départements selon le nombre de périodes pour lesquelles un $SIR > 1$ a été prédit par le modèle



IV - DISCUSSION

La tuberculose bovine est une maladie à évolution lente. Pour étudier les facteurs de risque de cette maladie à l'échelle d'un pays ou l'efficacité des plans de prophylaxie, il faut utiliser des séries de données longues. Au niveau européen, il y a peu de données disponibles d'incidence ou de prévalence cheptel pour des séries longues (plus de 30 ans).

En France, notre étude est la première qui a permis non seulement de décrire l'évolution de l'incidence et de la prévalence de la tuberculose bovine entre le début de la lutte (1965) et l'obtention du statut indemne (2000), mais d'étudier l'association entre cette évolution et celle des structures et des pratiques d'élevage. Cette étude a été réalisée sur des données agrégées dans le temps et dans l'espace, ce qui pourrait biaiser l'inférence des résultats au niveau cheptel. Ce biais est appelé

« ecological fallacy » [Morgenstern, 1982 ; Richardson *et al.*, 1987] : les données agrégées ne captent qu'une partie de l'hétérogénéité du niveau d'exposition des cheptels à l'infection et des valeurs des facteurs de risque entre les différents élevages du même département et durant la même période [Morgenstern, 1995]. En conséquence, les effets des variables estimés au niveau départemental, sur l'incidence de la tuberculose bovine, doivent être interprétés avec précaution lors d'inférence des résultats au niveau élevage ou lors de comparaison de nos résultats avec les études qui ont été réalisées au niveau cheptel.

Les prédictions de SIR par le modèle nous ont permis de décrire l'évolution de la distribution spatiale de la tuberculose bovine en France. Pour l'essentiel, les départements à risque étaient

localisés dans la moitié Sud de la France où une stagnation voire une augmentation des valeurs de SIR a été observée durant les sept périodes. Inversement, la partie nord de la France (notamment les zones C et O) était à risque faible, avec une diminution rapide des valeurs de SIR au cours du temps.

Cette variation géographique de la distribution de la tuberculose bovine entre le Sud (zone SE) et le Nord (les zones O et C) peut être liée au développement et au type d'élevage dominant dans ces zones. Le type, et donc l'importance économique du cheptel bovin, varie beaucoup entre ces trois zones. Dans la zone O, l'élevage bovin est très développé : c'est la première région laitière et également la première région en production de viande en France. La zone C est une région à prédominance allaitante, un secteur qui a connu une professionnalisation importante après l'application de la politique européenne de cessation de la production laitière (quotas laitiers, début des années 1980). L'élevage bovin est resté peu développé dans la zone SE et n'a pas une grande importance dans l'économie locale, le climat méditerranéen étant de plus en plus propice à la production fourragère nécessaire pour l'alimentation du bétail.

Dans notre étude, la taille moyenne des élevages était un facteur de risque de la tuberculose bovine (IR=1,15 [1,01-0,65]). Ce résultat est en accord avec des résultats antérieurs où la taille d'élevage est plutôt un facteur de risque au niveau cheptel [Brooks-Pollock et Keeling, 2009 ; Carrique-Mas *et al.*, 2008 ; Green et Cornell, 2005 ; Griffin *et al.*, 1996 ; Munroe *et al.*, 1999 ; Ramirez-Villaescusa *et al.*, 2010 ; Reilly et Courtenay, 2007 ; Wolfe *et al.*, 2010]. Les scientifiques britanniques expliquent l'effet de la taille sur la tuberculose bovine, en plus par l'augmentation de la probabilité de contact entre les bovins, par la capacité des grandes exploitations à acheter un nombre élevé de bovins, ce qui augmente la probabilité d'introduction des animaux infectés dans le troupeau, en même temps que la probabilité de détecter au moins un animal infecté lors de test de dépistage, puisque la sensibilité des tests de dépistage à l'échelle troupeau augmente avec le nombre d'animaux infectés.

Comme pour la taille moyenne des cheptels, l'augmentation de la densité de cheptels a été identifiée comme un facteur de risque de la tuberculose bovine (IR = 1,02 [1,0005 -1,08] IC 95 %). Ce résultat était attendu : plus il y a des cheptels dans une région, plus la probabilité pour

un cheptel d'être exposé à l'infection augmente, à cause des contacts sur les pâtures entre animaux d'élevages différents. Au cours des 35 ans de la période d'étude, la densité de cheptels bovins a diminué dans toutes les régions de France. Cette diminution de la densité des cheptels est la conséquence de la professionnalisation de l'élevage, avec la disparition des structures familiales ou de faible taille, économiquement non viables.

L'augmentation du pourcentage de la surface toujours en herbe dans la surface agricole utilisée (PSTH) a été identifiée comme un facteur de risque de la tuberculose bovine (IR = 1,03 [1,55 -1,13]). Cette variable est un indicateur de la superficie consacrée aux pâtures dans le département. L'augmentation de la superficie de pâturage augmente le nombre de troupeaux voisins, donc la transmission inter-élevages de la tuberculose bovine va augmenter. Le même résultat a été obtenu dans une étude anglaise réalisée en 1999 par les services vétérinaires [Humblot *et al.*, 2009].

Le modèle identifie le pourcentage des vaches laitières comme un facteur de risque (IR = 1,02 [1,001-1,09]). L'élevage laitier est un élevage où les animaux sont le plus souvent, voire en permanence, dans l'étable (système intensif). Le système d'élevage intensif est à risque élevé pour l'infection des cheptels par la tuberculose bovine par rapport aux autres systèmes d'élevages [Griffin *et al.*, 1993 ; O'Connor *et al.*, 1993], parce que les bovins dans ce système ont tendance à être en contact étroit par rapport aux bovins qui sont sur pâturage ; ce contact augmente potentiellement la probabilité de transmission intra-élevage, voire l'interaction avec la faune sauvage qui visite le bâtiment [Johnston *et al.*, 2011]. Tous ces éléments suggèrent une transmission intra-élevage de *M. bovis* plus intense en élevage laitier qu'en élevage allaitant. Ramirez *et al.* [2010] dans une étude de cohorte rétrospective réalisée dans le sud-ouest de l'Angleterre ont trouvé que la présence des vaches laitières dans un élevage était un facteur de risque d'infection de cheptel par la tuberculose bovine (OR = 2,18 [1,12 – 4,24]) [Ramirez-Villaescusa *et al.*, 2010]. Dans l'étude cas (1 150 cheptels)/témoins (2 852 cheptels) de Vial *et al.* [2011] l'élevage laitier était plus à risque pour la tuberculose bovine que les autres types d'élevages (OR = 1,30 [1,12 – 1,58]) [Vial *et al.*, 2011]. Ces auteurs expliquent ces résultats par le fait que dans l'élevage laitier les animaux ont une espérance de vie plus longue par rapport aux élevages allaitants, d'où la probabilité d'exposition à la tuberculose bovine et le nombre d'animaux

infectés augmente (il y a plus de temps pour l'incubation). Cet argument était valable en France jusque dans les années 1980, mais suite à l'application de la politique européenne de limitation de la production laitière, l'âge à la réforme des vaches laitières a diminué par rapport aux vaches allaitantes, puisque 90 % des vaches laitières sont réformées après deux lactations et demi [Derville *et al.*, 2009]. L'application du système des quotas laitiers à partir de 1984 a induit des changements dans la structure démographique des troupeaux laitiers, avec une baisse de l'âge à l'abattage, une augmentation du taux de réforme et une utilisation plus large de génisses nées dans l'exploitation pour le renouvellement du cheptel. Ces modifications ont réduit le risque d'infection par la tuberculose bovine dans les troupeaux laitiers au cours de trois dernières périodes d'étude (1985-2000). Néanmoins, le pourcentage de vaches laitières était un facteur de risque lorsqu'on prend en considération les sept périodes d'étude (1965 à 2000).

Les résultats du modèle ont montré qu'il y avait une association significative entre le rythme de prophylaxie et le risque de la tuberculose dans le département. Ce résultat était attendu puisque le rythme de prophylaxie est déterminé en fonction du taux de prévalence cheptel annuel. L'absence d'association entre SIR et rythmes de prophylaxie allégé (triennal, quadriennal), mixte ou arrêté suggère que l'arrêt du dépistage par IDT n'est pas la cause de la recrudescence de la maladie observée dans certains départements à partir de 2004.

Au bilan, la professionnalisation de l'élevage bovin en France a eu un effet important sur l'évolution de la tuberculose bovine. La transition de structures familiales aux exploitations professionnelles a eu pour conséquences une amélioration des conditions de biosécurité, des visites vétérinaires régulières, le respect des bonnes pratiques d'élevage (quarantaine, contrôle des animaux introduits) et la séparation des animaux en groupes distincts (selon leur âge). La

professionnalisation des exploitations a ainsi amélioré l'efficacité du plan de prophylaxie dans les deux types d'élevages laitier et allaitant et a permis la mise en œuvre des mesures clés pour la traçabilité des bovins, telles que l'identification individuelle des animaux.

Dans les zones où cette professionnalisation a commencé le plus tôt (les zones O, N et C) les valeurs de SIR ont diminué rapidement. Inversement, dans les zones où l'élevage bovin a une importance économique faible, cette professionnalisation a été moins marquée (moitié sud de la France), et les valeurs de SIR ont stagné, voire augmenté au cours du temps.

La spécialisation au cours du temps des élevages professionnels a eu pour effet une régression de l'élevage laitier et une progression en parallèle de l'élevage allaitant. Ces évolutions sont des conséquences directes de la politique européenne de limitation de la production laitière, via la mise en place de quotas laitiers (diminution de pourcentage des vaches laitières dans le département et changement dans la structure démographique des cheptels laitiers) et le soutien au cheptel allaitant à partir de 1980. Cette spécialisation explique sans doute en partie la réduction des valeurs de SIR à partir de la période 4 (1979-1984) dans la partie Nord de la France.

En conclusion, notre étude montre que l'évolution de l'incidence cheptel de la tuberculose bovine en France entre le début de la lutte (1965) et l'obtention de statut indemne (2000) est en partie imputable aux changements des pratiques et des structures d'élevage. La professionnalisation a été un facteur de réduction du risque de tuberculose bovine, surtout dans la partie Nord de la France. Dans la partie Sud de la France où la professionnalisation des exploitations est plus faible, le risque de la maladie est resté stable au cours du temps. L'effet de la politique européenne de réduction de la production laitière a également joué un rôle dans la réduction du risque de la maladie.

BIBLIOGRAPHIE

- Abellan J.J., Richardson S., Best N. - Use of space-time models to investigate the stability of patterns of disease. *Environ. Health. Perspect.*, 2008, **116**, 1111-1119.
- Alvarez J., Perez A.M., Bezos J., Casal C., Romero B., Rodriguez-Campos S., Saez-Llorente J.L., Diaz R., Carpintero J., de Juan L., Dominguez L. - Eradication of bovine tuberculosis at a herd-level in Madrid, Spain: study of within-herd transmission dynamics over a 12 year period. *BMC veterinary research.*, 2012, **8**, 100.
- Bénet J.J., Boschioli M.L., Dufour B., Garin-Bastuji B. - Lutte contre la tuberculose bovine en France de 1954 à 2004: Analyse de la pertinence épidémiologique de l'évolution de la réglementation *Épidémiol. et santé anim.*, 2006, **50**, 127-143.
- Besag J., York J., Mollie A. - Bayesian image restoration with applications in spatial statistics. *Ann. Inst. Math. Stat.*, 1991, **43**, 1-20.
- Brooks-Pollock E., Keeling M. - Herd size and bovine tuberculosis persistence in cattle farms in Great Britain. *Prev. Vet. Med.*, 2009, **92**, 360-365.
- Carrique-Mas J.J., Medley G.F., Green L.E. - Risks for bovine tuberculosis in British cattle farms restocked after the foot and mouth disease epidemic of 2001. *Prev. Vet. Med.*, 2008, **84**, 85-93.
- Derville M., Patin S., Avon L. - Races bovines de France: Origine, Standard, Sélection, 1st edn. *Édition France Agricole, Paris.*, 2009.
- Gilbert M., Mitchell A., Bourn D., Mawdsley J., Clifton-Hadley R., Wint W. - Cattle movements and bovine tuberculosis in Great Britain. *Nature*, 2005, **435**, 491-496.
- Green L.E., Cornell S.J. - Investigations of cattle herd breakdowns with bovine tuberculosis in four counties of England and Wales using VETNET data. *Preventive veterinary medicine.* 2005, **70**, 293-311.
- Griffin J.M., Hahey T., Lynch K., Salman M.D., McCarthy J., Hurley T. - The association of cattle husbandry practices, environmental factors and farmer characteristics with the occurrence of chronic bovine tuberculosis in dairy herds in the Republic of Ireland. *Prev. Vet. Med.*, 1993, **17**, 145-160.
- Griffin J.M., Wayne Martin S., Thorburn M.A., Eves J.A., Hammond R.F. - A case-control study on the association of selected risk factors with the occurrence of bovine tuberculosis in the Republic of Ireland. *Prev. Vet. Med.*, 1996, **27**, 217-229.
- Humblet M.F., Boschioli M.L., Saegerman C. - Classification of worldwide bovine tuberculosis risk factors in cattle: a stratified approach. *Veterinary research.*, 2009, **40**, 50.
- Humblet M.F., Gilbert M., Govaerts M., Fauville-Dufaux M., Walravens K., Saegerman C. - New assessment of bovine tuberculosis risk factors in Belgium based on nationwide molecular epidemiology. *J. Clin. Microbiol.*, 2010, **48**, 2802-2808.
- Johnston W.T., Vial F., Gettinby G., Bourne F.J., Clifton-Hadley R.S., Cox D.R., Crea P., Donnelly C.A., McInerney J.P., Mitchell A.P., Morrison W.I., Woodroffe R. - Herd-level risk factors of bovine tuberculosis in England and Wales after the 2001 foot-and-mouth disease epidemic. *Int. J. Infect. Dis.*, 2011, **15**, e833-840.
- Karolemeas K., McKinley T.J., Clifton-Hadley R.S., Goodchild A.V., Mitchell A., Johnston W.T., Conlan A.J., Donnelly C.A., Wood J.L. - Recurrence of bovine tuberculosis breakdowns in Great Britain: risk factors and prediction. *Prev. Vet. Med.*, 2011, **102**, 22-29.
- Kelsall J.E., Wakefield J.C. - Discussion of "Bayesian models for spatially correlated disease and exposure data", by Best *et al.* In Bayesian Statistics 6. J.M. Bernardo, J.O. Berger, A.P. Dawid and A.F.M. Smith (eds). *Oxford. Univ. Press.*, 1999, p. 151.
- Kunsch H.R. - Intrinsic autoregressions and related models on the two dimensional lattice. *Biometrika.*, 1987, **74**, 517-524.
- Lawson A.B., Browne W.J., Rodeiro C.L.V. - Disease Mapping with WinBUGS and MLwiN, 1st edn. *John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex.*, 2003.
- Lunn D., Spiegelhalter D., Thomas A., Best N. - The BUGS project: Evolution, critique and future directions. *Stat. Med.*, 2009, **28**, 3049-3067.

- Lunn D.J., Thomas A., Best N., Spiegelhalter D. - WinBUGS - A Bayesian modelling framework: Concepts, structure, and extensibility. *Statistics and Computing.*, 2000, **10**, 325-337.
- Morgenstern H. - Uses of ecologic analysis in epidemiologic research. *Am. J. Public. Health*, 1982, **72**, 1336-1344.
- Morgenstern H. - Ecologic studies in epidemiology: concepts, principles, and methods. *Annu. Rev. Public. Health*, 1995, **16**, 61-81.
- Munroe F.A., Dohoo I.R., McNab W.B., Spangler L. - Risk factors for the between-herd spread of *Mycobacterium bovis* in Canadian cattle and cervids between 1985 and 1994. *Prev. Vet. Med.*, 1999, **41**, 119-133.
- Munyeme M., Muma J.B., Skjerve E., Nambota A.M., Phiri I.G., Samui K.L., Dorny P., Tryland M. - Risk factors associated with bovine tuberculosis in traditional cattle of the livestock/wildlife interface areas in the Kafue basin of Zambia. *Prev. Vet. Med.*, 2008, **85**, 317-328.
- O'Connor R., Conway A., Murphy M. - Study of Socio-Economic Impediments to Bovine Tuberculosis Eradication. *A Report by The Economic and Social Research Institute for the Eradication of Animal Disease Board. Dublin*, 1993, 215pp.
- Olea-Popelka F.J., White P.W., Collins J.D., O'Keeffe J., Kelton D.F., Martin S.W. - Breakdown severity during a bovine tuberculosis episode as a predictor of future herd breakdowns in Ireland. *Prev. Vet. Med.*, 2004, **63**, 163-172.
- Pluvinage J. - Regard sur l'élevage bovin français et son avenir, 1st edn. *Editions Genin-Librairies Techniques, Paris*, 1971.
- Ramirez-Villaescusa A.M., Medley G.F., Mason S., Green L.E. - Risk factors for herd breakdown with bovine tuberculosis in 148 cattle herds in the south west of England. *Prev. Vet. Med.*, 2010, **95**, 224-230.
- Reilly L.A., Courtenay O. - Husbandry practices, badger sett density and habitat composition as risk factors for transient and persistent bovine tuberculosis on UK cattle farms. *Prev. Vet. Med.*, 2007, **80**, 129-142.
- Richardson S., Stucker I., Hemon D. - Comparison of relative risks obtained in ecological and individual studies: some methodological considerations. *Int. J. Epidemiol.*, 1987, **16**, 111-120.
- Robert C. - The Bayesian Choice. From Decision-Theoretic Foundations to Computational Implementation, 2nd edn. *Springer, New York*, 2007.
- Vial F., Johnston W.T., Donnelly C.A. - Local cattle and badger populations affect the risk of confirmed tuberculosis in British cattle herds. *PLoS. One.*, 2011, **6**, e18058.
- Wolfe D.M., Berke O., Kelton D.F., White P.W., More S.J., O'Keeffe J., Martin S.W. - From explanation to prediction: a model for recurrent bovine tuberculosis in Irish cattle herds. *Prev. Vet. Med.*, 2010, **94**, 170-177.

