

ÉTUDE DU VOISINAGE ENTRE ÉLEVAGES BOVINS EN 2010 DANS UNE ZONE DE BOURGOGNE INFECTÉE DE TUBERCULOSE PAR LA MÉTHODE D'ANALYSE DES RÉSEAUX *

Laure Dommergues¹, Séverine Rautureau², Etienne Petit³ et Barbara Dufour¹

RÉSUMÉ

La France a obtenu le statut officiellement indemne de tuberculose bovine en 2001. Depuis, la Côte-d'Or a fait face à une recrudescence du nombre de foyers qui ont été attribués à une contamination par le voisinage dans 35 % des cas. Le but de cette étude était de décrire finement les facteurs de risque du voisinage dans une zone infectée de tuberculose bovine, à partir d'une enquête de terrain et en utilisant la méthode d'analyse des réseaux sociaux. Tous les contacts ne présentant pas le même risque pour la transmission de la tuberculose, une pondération a été effectuée. Dans la zone, 95 % des contacts étaient explicables par des contacts directs au pâturage, ou indirects *via* des blaireaux ou des sangliers. Les différentes modalités de contacts n'étaient pas indépendantes entre elles et aucune ne pouvait expliquer à elle seule les contacts de voisinage d'une exploitation, ce qui conduit à devoir envisager la mise en œuvre simultanée de plusieurs mesures de lutte dans les exploitations.

Mots-clés : tuberculose bovine, voisinage, analyse des réseaux sociaux, Bourgogne, France.

SUMMARY

France attained "Officially Tuberculosis-Free" status in 2001. However, the Côte-d'Or *department* (a French administrative unit) has since seen an increase in bovine tuberculosis (bTB) cases, with 35% of cases attributed to neighborhood contamination. The aim of this field study was to investigate the risk factors of neighborhood contacts in an area affected by bTB in 2010, through the use of social network methods. Contacts were weighted, as not all types of contact carried the same risk of bTB transmission. We attributed 95% of the contacts to direct contact in pasture or contact with wild boars or badger latrines. Most of the contact types were correlated but none was sufficient in itself to account for all contacts between one particular farm and its neighbors. Contacts with neighbors therefore represent a challenge for the implementation or improvement of on farm control measures.

Keywords: Bovine tuberculosis, Neighbourhood, Social network analysis, Burgundy, France.



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

¹ Unité EPIMAI, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort, USC Anses, Maisons-Alfort, France

² Unité EPI, Anses Maisons-Alfort, France

³ FRGDS Bourgogne, Dijon, France

I - INTRODUCTION

Malgré le statut européen de pays officiellement indemne de tuberculose bovine [EFSA, 2008], certaines zones de France font actuellement face à une recrudescence de foyers de cette infection. Trois groupes de causes permettent d'expliquer la contamination d'un élevage : l'introduction d'un animal infecté, la contamination par le voisinage, et la résurgence à partir d'un ancien foyer [Bénet *et al.*, 2006]. Cependant sur le terrain, ces causes générales ne reflètent qu'imparfaitement la perception que peuvent en avoir les acteurs. Ainsi, les relations de voisinage sont nombreuses et diverses [Humblot *et al.*, 2009] et il est apparu intéressant de préciser l'impact relatif de ces relations de voisinage dans le but d'adapter au mieux les mesures de contrôle.

Le voisinage d'un élevage bovin comprend des éléments aussi variés que : les parcelles voisines où les bovins pourraient entrer en contact direct, l'échange de services ou de matériels, qui se fait plus facilement avec des voisins qu'avec des inconnus, ou encore la proximité d'animaux sauvages réservoirs qui peuvent être vecteurs de tuberculose bovine entre deux exploitations qui n'étaient pas *a priori* voisines.

L'intérêt de la méthode d'analyse des réseaux sociaux est d'évaluer individuellement la position et le rôle de chaque individu au sein d'un groupe en prenant en compte les relations entre les individus dans ce groupe au lieu de prendre en compte les caractéristiques personnelles de chacun des individus [Anderson et Jay, 1985 ; Wasserman, 1994]. Par exemple au sein d'une entreprise, on s'intéresserait au nombre de relations de subordination dans laquelle chaque individu est impliqué plutôt qu'à son âge ou sa catégorie socioprofessionnelle. L'analyse des réseaux sociaux est une application de la théorie mathématique des graphes. On peut l'utiliser dans le cadre de l'épidémiologie si on considère qu'un agent infectieux ne peut se propager que grâce à des relations entre les hôtes [Klowdahl, 1985 ; Webb, 2005].

L'objectif de cette étude était de décrire précisément, grâce à la méthode d'analyse des réseaux sociaux, le phénomène de voisinage entre les exploitations bovines d'une zone où la tuberculose bovine est présente.

II - MÉTHODE

1. ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude a été définie comme le triangle délimité par les communes de Châteauneuf, La Bussière-sur-Ouche et Sainte Marie-sur-Ouche (Côte-d'Or, 21). Cette zone se situe dans la vallée de l'Ouche et a été fortement touchée par la tuberculose bovine, huit élevages de la zone ayant déjà été déclarés infectés de tuberculose.

2. CONTACTS À ÉTUDIER

Nous avons choisi de ne pas inclure tous les liens (ou contacts, les deux termes sont synonymes) imaginables entre deux exploitations. La tuberculose n'étant pas une maladie très contagieuse, nous avons décidé de nous focaliser sur des liens qui pouvaient correspondre à des contacts « étroits » entre deux exploitations et qui pouvaient conduire à une transmission de *M. bovis*

en Côte-d'Or. Par exemple, les contacts avec un vétérinaire qui ne passe qu'environ une heure dans l'exploitation n'ont pas semblé être un contact étroit, ou ceux avec les cervidés qui dans le département ne semblaient pas en 2010 présenter un risque fort de contamination n'ont pas été étudiés.

Les contacts suivants ont été pris en compte dans l'étude :

- Pâtures adjacentes,
- Divagation,
- Prêt/emprunt de bovin ou mise en pension,
- Achat/vente/location/prêt d'herbe,
- Utilisation de matériel en commun (couloir, bétailière et épandeur),

- Contact avec la faune sauvage (blaireaux et sangliers),
- Participation à un rassemblement de bovins (marché ou concours).

3. ENQUÊTE DE TERRAIN

Les élevages bovins de la zone d'étude ont été recensés grâce au Système d'information de la DGAI (Direction générale de l'alimentation), SIGAL. Chaque éleveur a été contacté par téléphone pour convenir d'un entretien individuel avec lui. Pendant la visite, les données de géo-référencement des élevages ont été utilisées pour faciliter le recueil des informations relatives aux pâtures. Au cours de l'entretien, pour chaque type de contact étudié, des informations étaient recueillies sur l'élevage d'origine et de destination, ou lorsqu'il ne s'agissait pas d'un élevage, l'identification de l'élément correspondant (rassemblement, matériel, lieu d'observation de la faune sauvage). De plus, il a été demandé à l'éleveur de quantifier l'intensité du contact (nombre de bovins achetés par exemple), la durée du contact en jours.

Les pâtures n'ont généralement pas été visitées sauf celles accessibles rapidement à pieds depuis le siège de l'exploitation, ce qui a surtout permis de relier la description des clôtures à leur aspect réel.

Seul l'atelier bovin de l'exploitation a été étudié.

4. CONSTRUCTION DU RÉSEAU DE CONTACTS DE VOISINAGE

4.1. CONSTRUCTION D'UN RÉSEAU PAR TYPE DE CONTACT

Un réseau est constitué de nœuds (ici ils représentent les élevages) et de liens (ici les liens sont les contacts). Les données ont été traitées avec Microsoft Office Access 2007 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA). Les calculs sur les réseaux ont été réalisés sous R (packages *igraph* et *sna*) [Team RDC, 2011] et les représentations graphiques sous Pajek [Batagelj et Mrvar, 1998].

Au sein de réseaux comparables, c'est-à-dire avec le même nombre et la même nature de nœuds (les élevages), nous avons représenté les contacts indirects par des traits reliant directement les élevages. Pour le matériel en commun, un contact

représentait le fait de partager du matériel. Pour les contacts via des latrines de blaireaux, un lien entre deux élevages représentait le fait que des bovins des deux élevages avaient pâture à moins d'un km d'un même terrier de blaireau. Pour les contacts via des sangliers, un lien entre deux élevages représentait le fait que des bovins des deux élevages avaient pâture sur des parcelles ayant eu des dégâts causés par des sangliers et que ces parcelles étaient situées à proximité d'un même massif forestier.

4.2. ASSEMBLAGE DES RÉSEAUX

La théorie des graphes permet d'assembler des réseaux comme on additionne des matrices en algèbre. Le modèle global de voisinage a été défini ici comme la somme de tous les réseaux de contacts pondérée par le risque de contamination inhérent à chaque type de contact. Dix experts français de la tuberculose bovine ont été interrogés selon une méthode Delphi modifiée. Ils ont été contactés par e-mail pour classer les contacts listés ci-dessus en fonction du risque qu'ils représentent. Il était précisé que l'on devait se placer dans des conditions « réalistes », et non dans des conditions idéales, que le contexte épidémiologique était celui de la Côte-d'Or en 2010 et que l'on s'intéressait aux conséquences potentielles d'un contact et non à sa fréquence d'apparition. Puis il a été demandé aux experts dont la réponse différait beaucoup de la moyenne de confirmer ou de modifier leur réponse. S'ils choisissaient de confirmer, une justification a été demandée.

Cette consultation nous a amenés à construire un réseau global de contacts dans lequel le poids attribué à chaque type de contact était proportionnel au nombre d'animaux impliqués, à la durée d'un contact, au nombre d'occurrences du contact au cours de l'année 2010 et au risque défini par les experts. Pour les contacts directs de bovin à bovin, la durée du contact a été définie comme le nombre de jours de contact. Pour les contacts indirects, nous avons utilisé une valeur hypothétique en procédant par analogie avec les contacts directs. Le réseau synthétique des contacts était donc la somme des réseaux par type de contact après la prise en compte de cette pondération. Le « poids » d'un contact a été représenté graphiquement par l'épaisseur du trait qui relie deux nœuds.

5. ANALYSE DES RÉSEAUX DE CONTACTS

5.1. ANALYSE D'UN RÉSEAU DANS SA GLOBALITÉ

La densité est l'indicateur qui correspond à la « quantité » de liens dans le réseau. Elle peut se mesurer sur des réseaux binaires. Dans ce cas elle correspond au nombre de liens dans le réseau divisé par le nombre total de liens possibles et est située entre 0 et 1. On peut aussi la mesurer sur des réseaux pondérés. Dans ce cas, elle est la somme de toutes les valeurs que prennent les liens du réseau. Dans le cas du voisinage de pâturage, les liens n'ont pas de valeur maximale possible, il n'y a donc pas de maximum théorique pour la densité du réseau pondéré.

Pour étudier chaque réseau dans sa globalité, nous avons comparé la quantité de contacts directs (la densité) à la proportion de paires de nœuds qui peuvent être reliées entre elles (quelle que soit la distance entre les nœuds). Cela nous a donné une estimation plus juste des possibilités de diffusion d'une maladie.

5.2. ANALYSE DES SOUS-GROUPES AU SEIN DU RÉSEAU

Afin de détecter d'éventuels sous-groupes au sein du réseau, nous avons étudié le nombre et la taille des composants, nous avons recherché les points d'articulation (« *cutpoints* ») et les cliques.

Un composant est une partie « connectée » du réseau : au sein d'un composant tous les nœuds sont accessibles par les liens existants à partir de n'importe quel nœud du composant, c'est-à-dire que si une infection est introduite au sein d'un composant, elle pourra contaminer tous les élevages qui en font partie mais ne pourra pas aller plus loin. Les points d'articulation sont des nœuds qui, s'ils étaient retirés du réseau (avec leurs connexions), entraîneraient une augmentation du nombre de composants. Les élevages correspondants sont donc des points « stratégiques » pour la maîtrise de la propagation

d'une infection : si on les retire (c'est-à-dire si on isole ou abat le cheptel), le nombre de composants augmente et leur taille (donc l'extension maximale de l'infection) diminue. A l'inverse, les cliques sont des sous-groupes très denses : chaque membre d'une clique est relié à tous les autres. En termes épidémiologiques, c'est une zone à haut risque car chaque élevage peut se faire contaminer par beaucoup d'autres et il peut en retour contaminer de nombreux élevages.

5.3. ANALYSE INDIVIDUELLE DES NŒUDS

Nous avons déterminé la place de chaque élevage au sein du réseau en calculant son degré. Le degré d'un nœud est le nombre d'autres nœuds avec lesquels il a un lien direct. Comme les élevages étaient capables de nommer l'intégralité de leurs contacts, deux mesures ont été réalisées : le degré dans la zone et le degré « total », qui compte aussi les contacts avec des élevages dont le siège social était situé en dehors du territoire étudié. Le degré d'un élevage correspond à la fois au risque qu'il subit (se faire contaminer par plus ou moins d'élevages) mais aussi au risque qu'il représente pour les autres (contaminer plus ou moins d'autres élevages si jamais il était lui-même atteint).

5.4. ANALYSE DU RÉSEAU SYNTHÉTIQUE DE VOISINAGE

La contribution de chaque réseau au réseau synthétique de voisinage a été étudiée à partir des densités dans chaque réseau : un réseau individuel pouvait apporter au réseau global soit l'existence d'un contact entre élevages, soit une force particulière à ce contact. La force d'un contact dépendait du nombre de fois où ce contact avait été observé, du nombre d'animaux impliqués et du temps de contact (déterminé à l'aide des experts). Graphiquement, l'épaisseur des traits était proportionnelle à la force du contact.

III - RÉSULTATS

1. POPULATION ÉTUDIÉE

Vingt-six élevages ont été recensés dans la zone d'étude. Un éleveur a refusé de participer à l'enquête. Dans trois cas, deux éleveurs avec des numéros d'élevage différents travaillaient

ensemble et fonctionnaient comme un seul élevage. Ils ont été considérés comme trois élevages et non six distincts. Au final, l'étude a donc porté sur 22 élevages.

Tous les élevages interrogés étaient de type allaitant. Quinze élevaient des bovins de race charolaise, les sept autres élevaient des salers, des limousines, des gasconnes, des Herford ou divers croisements. Le nombre médian de naissances en 2010 était de 40 (extrêmes : 1 à 120, espace interquartile (EIQ) : 23-50). Pour trois exploitations, tous les bovins étaient élevés intégralement en plein air. Pour six autres, certaines catégories de vaches étaient toujours en plein air et d'autres étaient rentrées l'hiver. La surface agricole utile (SAU) médiane était de 127 ha (extrêmes : 8 à 355 EIQ : 82-235). Dans cinq élevages, une production de moutons était associée à celle de bovins.

2. RISQUE ASSOCIÉ À CHAQUE TYPE DE CONTACT

Neuf experts sur les 10 contactés ont répondu. Au départ, les réponses étaient très différentes. Puis, lorsque les experts ont pu comparer leur réponse à celles des autres (de façon anonyme) les résultats

sont devenus beaucoup plus concordants. Tous les experts considéraient que l'introduction d'animaux était le type de contact le plus à risque. Tous ont répondu que le risque était plus grand avec les blaireaux qu'avec les sangliers. Ils pensaient tous que le contact entre bovins de parcelles voisines était plus à risque que la divagation qui elle-même était plus à risque que le partage de matériel. En revanche, les experts n'ont pas réussi à se mettre d'accord sur la différence de risque entre les contacts directs au pâturage et les contacts via des latrines de blaireaux.

Nous avons choisi une pondération en fonction de la durée de chaque type de contact : les mises en pension ont duré en médiane six mois, les animaux ont en général pâturé du 15 mars au 15 novembre, les divagations ont duré en médiane deux jours.

Le tableau 1 récapitule les poids accordés à chaque type de contact, cette pondération concordait avec les avis des experts.

Tableau 1

Pour chaque type de contact, pondération en fonction du risque pour la transmission inter-troupeaux de tuberculose bovine

Type de contact	Risque (échelle arbitraire)
Pension	180
Contact au pâturage	30
Contact via des blaireaux	30
Divagation	15
Contact via des sangliers	5
Partage de matériel	5

3. ANALYSE DU RÉSEAU DANS SA GLOBALITÉ

3.1. VOISINAGE DE PÂTURAGE

Il s'agissait ici de contacts de bovins au pâturage. Sur les 335 clôtures recensées, 37,9 % ont été considérées comme infranchissables, c'est-à-dire ne permettant aucun contact entre les bovins de part et d'autre, et 45,3 % ont été considérées comme très perméables c'est-à-dire permettant des contacts mufle à mufle faciles. Seules les clôtures ayant réellement permis un contact au pâturage ont été prises en compte par la suite. En médiane, 18 bovins étaient en contact (répartis de part et d'autre de la clôture), les valeurs allant de 2 à 55 (EIQ : 12,25-26). Le réseau est représenté par la figure 1(a). Il comprenait 22 nœuds et 24 liens,

soit une densité de 0,104 qui signifie que 10,4 % des liens possibles dans le réseau existaient réellement. Cependant, il était possible de relier entre elles presque la moitié des paires d'élevages possibles dans le réseau. En médiane, il suffisait de deux contacts pour relier deux élevages, c'est-à-dire que pour relier deux élevages A et B pris au hasard, dans 50 % des cas le chemin faisait intervenir au maximum un élevage intermédiaire. Si A était contaminé, B serait facilement atteint.

Cela signifie que même avec peu de liens dans le réseau (10 % de ce qui serait théoriquement possible), de nombreux élevages sont reliés entre eux et une maladie pourrait circuler de l'un à l'autre.

3.2. DIVAGATION

Le réseau de divagation est présenté sur la figure 1(c). Au sein de la zone, 10 élevages ont été impliqués dans six liens en raison de divagation d'animaux, soit un réseau de densité 0,026. Dans un cas, une divagation a été responsable de l'apparition d'un contact au pâturage entre deux élevages qui n'étaient au départ pas voisins de pâture.

3.3. MATÉRIEL EN COMMUN

Le réseau est représenté par la figure 1(d). Sur les 22 élevages interrogés, 13 ont déclaré utiliser du matériel en commun avec d'autres éleveurs de la zone. Au total, six bétailières, quatre couloirs et six épandeurs ont été partagés. A chaque fois, la mise en commun correspondait seulement à un matériel sauf pour deux doublets (pour l'un, couloir, bétailière et épandeur étaient partagés ; pour l'autre, bétailière et épandeur étaient partagés). En prenant une paire d'élevages dans le réseau, il était impossible de les relier dans plus de 90 % des cas.

3.4. FAUNE SAUVAGE

3.4.1. Blaireaux

Le réseau est représenté par la figure 1(b). Trente et un contacts ont été recensés au sein de la zone ce qui donne au réseau une densité de 0,134. 13,4 % de liens possibles dans le réseau existaient, mais en prenant en compte les élevages intermédiaires (l'élevage B si A est en contact avec B qui lui-même est en contact avec C), un quart des paires d'élevages pouvaient être reliées.

3.4.2. Sangliers

Le réseau est présenté à la figure 1(e). Il comprenait 121 liens, soit une densité de 0,52. En prenant une paire de nœuds au hasard dans ce réseau, la probabilité de pouvoir les relier directement ou indirectement était aussi d'environ 50 %.

3.5. PRÊT, EMPRUNT OU MISE EN PENSION DE BOVINS, PRÊT D'HERBE, PARTICIPATION À UN RASSEMBLEMENT

Les pensions ont concerné cinq élevages de la zone

sur 22 et 14 animaux échangés (soit 1,7 % des mouvements d'animaux) contre 825 achats et ventes. Aucune pension n'a fait apparaître de lien direct ou indirect (en passant par un élevage hors de la zone) qui aurait pu entraîner la contamination d'un élevage de la zone à partir d'un autre élevage de la zone. Aucun prêt d'herbe n'a été déclaré. Un seul élevage a participé à un concours. Ces réseaux où tous les nœuds sont isolés n'ont pas été étudiés de manière plus détaillée.

4. ANALYSE DES SOUS-GROUPES AU SEIN DU RÉSEAU

4.1. VOISINAGE DE PÂTURAGE

Dans le réseau de contacts au pâturage, le plus grand composant regroupait 15 nœuds (si on introduisait la maladie en un point du réseau, elle pourrait contaminer au maximum 15 élevages) et sept élevages étaient isolés. La plus grande et la seule clique (sous-réseau à haut risque où « tout le monde est relié directement à tout le monde ») du réseau comprenait quatre élevages. Trois points d'articulations (élevages stratégiques car si on les isolait, le nombre de sous-groupes dans le réseau augmenterait et leur taille diminuerait, ce qui limiterait d'autant l'extension maximale d'une maladie qui serait introduite dans le réseau) ont été mis en évidence dont deux faisaient partie de la clique.

4.2. DIVAGATION

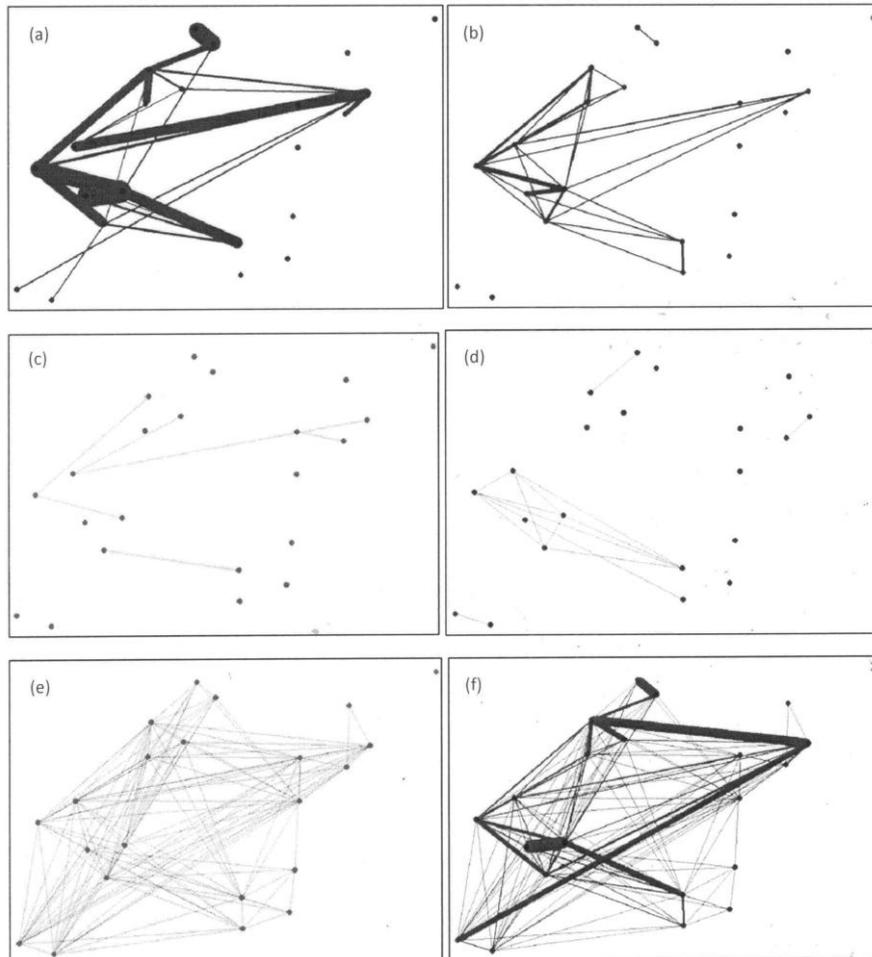
Ce réseau comprenait quatre composants (deux triplets et deux doublets), deux points d'articulation et pas de clique de taille supérieure ou égale à 3.

4.3. MATÉRIEL EN COMMUN

Le réseau comprenait un composant de six nœuds (dont cinq formaient une clique), trois doublets et neuf isolats. On peut noter que le composant de six nœuds correspondait à une CUMA (Coopérative d'utilisation de matériel agricole). Un élevage de la clique était un point d'articulation.

Figure 1

Représentation des différents réseaux de contacts (a) au pâturage, (b) via des latrines de blaireaux, (c) lors de divagations, (d) avec du matériel en commun, (e) via des sangliers, (f) réseau synthétique reprenant tous les types de contacts



4.4. FAUNE SAUVAGE

4.4.1. Blaireaux

Le plus grand composant comprenait 12 nœuds parmi lesquels 10 étaient impliqués dans trois cliques de cinq et deux cliques de quatre nœuds. Un point d'articulation a été mis en évidence dans ce composant. Deux élevages étaient réunis dans un doublet.

4.4.2. Sangliers

Vingt-et-un élevages faisaient partie du plus grand composant ; un seul élevage était isolé. Treize nœuds étaient impliquées dans les cinq plus grandes cliques qui comptaient chacune 10 nœuds.

Il y avait aussi des cliques de neuf, huit, sept, et quatre nœuds. Aucun point d'articulation n'a été mis en évidence. Ce réseau comprenait donc de nombreuses zones à haut risque mais aucun élevage ne pouvait être considéré comme « stratégique » pour la gestion, c'est-à-dire que dans aucun cas la suppression d'un élevage du réseau (son isolement ou l'abattage du cheptel) n'aurait permis de diminuer l'aire maximale d'extension de la maladie.

5. ANALYSE INDIVIDUELLE DES NŒUDS : DEGRÉ

La figure 2 montre la médiane, l'espace interquartile et l'étendue des valeurs de degré au sein des différents réseaux de contacts. Comme les

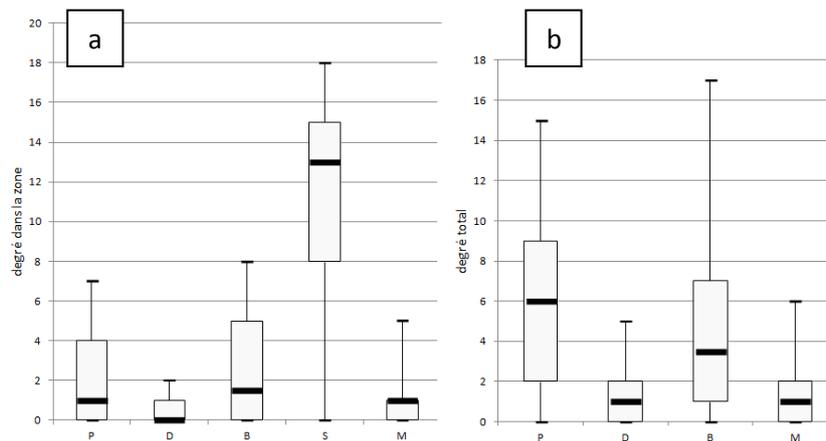
élevages étaient capables de nommer l'intégralité de leurs contacts, deux mesures ont été réalisées : le degré dans la zone et le degré « total », qui

compte aussi les contacts avec des élevages dont le siège social était situé en dehors du territoire étudié.

Figure 2

Médiane, espace interquartile et étendue pour (a) le degré dans la zone et (b) le degré total.

Les contacts suivants sont représentés : (P) au pâturage, (D) lors de divagations, (B) via des latrines de blaireaux, (S) via des sangliers, (M) avec du matériel en commun



Plusieurs facteurs expliquant les valeurs de degré dans le réseau de contacts au pâturage ont été étudiés. Aucune association n'a été trouvée entre le degré et la taille du cheptel ni entre le degré et le fait de pâturer toute l'année en revanche le degré était proportionnel au nombre de parcelles (pente : 1,58 ; $r^2 = 0,67$).

6. RÉSEAU SYNTHÉTIQUE DES CONTACTS DE VOISINAGE

Le réseau est présenté à la figure 1(f). Les densités des différents réseaux ont été mesurées, d'abord sans prendre en compte la force des contacts (elle représentait donc uniquement le nombre de liens dans le réseau), puis en prenant en compte la force des contacts. La force des contacts, représentée par l'épaisseur des traits, était proportionnelle à la fois au nombre de fois où le contact a été

enregistré lors de l'enquête, au nombre d'animaux impliqués et au poids associé à chaque type de contact à la suite de la consultation des experts (correspondant à la durée du contact). Il faut noter que les contacts multiples ont été pris en compte de la façon suivante : si deux élevages étaient reliés par deux types de contacts, un seul contact a été comptabilisé et la force de ce contact est la somme des forces de tous les contacts qui le composent. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Tous les contacts entre élevages de la zone pouvaient s'expliquer par l'un des trois types de contacts suivants : contact direct au pâturage, contact avec des blaireaux, contacts avec des sangliers. Si on prenait en compte la pondération des liens, ces trois types de contacts expliquaient plus de 95 % des contacts entre les exploitations.

Tableau 2

Densités des réseaux représentant les différents types de liens étudiés et le réseau global

Réseau	Nombre de liens	Force des liens
Sangliers (S)	121	187
Blaireaux (B)	31	246
Contact au pâturage (P)	24	444
Divagation (D)	14	16
Matériel commun (M)	6	24
Réseau total (SBPDM)	122	917

IV - DISCUSSION

1. MÉTHODE

1.1. PROTOCOLE D'ENQUÊTE

Il était important de choisir une zone dans laquelle les éleveurs étaient sensibilisés au problème de la tuberculose bovine pour avoir un bon taux de participation et s'approcher de l'exhaustivité. Cela nous a conduit à étudier une zone d'élevage très particulière, exclusivement allaitante, avec un parcellaire très morcelé dans une région très boisée.

Des contraintes de moyens nous ont conduits à étudier un réseau ne comprenant que 22 élevages. Cela a parfois abouti à l'observation d'un réseau assez morcelé avec beaucoup d'isolats (jusqu'à huit élevages sur 22 dans le réseau du matériel en commun) qui ne reflètent pas très bien la réalité des contacts des élevages avec d'autres élevages. Par exemple, sur les six élevages qui ne semblaient pas avoir de contacts au pâturage, en réalité cinq avaient des contacts au pâturage avec des élevages hors de la zone. En augmentant la taille du réseau de départ, il serait intéressant de voir si le nombre (ou au moins la proportion) d'isolats pourrait diminuer. A notre connaissance, aucun critère n'a été défini pour choisir une taille optimale pour une étude de réseau d'élevages bovins, ni en termes de nombre de d'élevages ni en termes de nombre de contacts. Une étude conduite en Angleterre [Brennan *et al.*, 2008] avait défini la population d'étude comme étant tous les élevages situés dans un carré de 10 km de côté. Ils avaient abouti à un réseau de 56 élevages.

Les données utilisées dans cette étude reposaient entièrement sur les réponses des éleveurs aux entretiens qui se sont déroulés chez eux au mois de février 2011. Pour obtenir les réponses les plus proches possibles de la réalité, il était donc nécessaire d'obtenir la confiance des éleveurs. Pour cette raison, l'enquête a été introduite par le GDS, association à laquelle presque tous les éleveurs adhèrent. Malgré cela, un éleveur a refusé de participer à l'enquête. Cet éleveur, dont l'élevage avait été un foyer de tuberculose ne voulait pas participer à une x-ième enquête dont il ne voyait pas directement les conséquences. Tous les autres ont accepté de faire partie de l'étude et ont participé avec beaucoup de bonne volonté.

Une sous-déclaration a été notée, en particulier pour les divagations où les informations n'ont jamais été fournies de façon réciproque : si l'éleveur A signalait que des vaches avaient été mélangées avec celles de B en 2010, B ne disait rien à ce sujet. Toutes les divagations rapportées ont été prises en compte, malgré cette absence de réciprocity. En revanche, les données étaient très cohérentes pour ce qui concernait l'utilisation des pâtures, la qualité des clôtures et les informations sur la faune sauvage. Il est probable que toutes les données qui *auraient pu* être vérifiées nous ont été rapportées très fidèlement et avec beaucoup de précisions. A l'inverse, des pratiques invérifiables et à la limite de la réglementation ont pu être cachées. Mais le fait d'interroger tous les éleveurs de la zone a permis un bon recoupement des informations, ce qui aurait été impossible sur un nombre très élevé d'élevages.

1.2. ÉVALUATION DU RISQUE

Le risque associé à chaque type de contact a été évalué en faisant appel à des experts par une méthode Delphi modifiée. L'opinion d'un expert est par définition subjective. Elle varie notamment en fonction du domaine habituel d'exercice de l'expert. Par exemple, un spécialiste de la faune sauvage pourrait surestimer le risque lié à la faune sauvage et sous-estimer les risques liés aux autres types de contacts. Nous avons essayé de limiter ce phénomène en rappelant aux experts tous les contacts d'intérêt et en les décrivant succinctement. De plus, nous avons choisi des experts issus d'horizons professionnels divers : vétérinaire praticien, chercheurs, décideurs. Si des estimations devaient être faussées à cause de la subjectivité de chacun, on peut penser que ces écarts n'auraient pas lieu systématiquement dans la même direction. C'est effectivement ce qui s'est produit lors du premier tour. Puis la confrontation avec les réponses des autres experts présentées anonymement a permis un recentrage des réponses.

Malgré cela, la consultation des experts en deux fois par courriel n'a pas abouti à un consensus parfait. L'avantage de la méthode utilisée était de préserver l'anonymat des réponses et donc d'empêcher un ou plusieurs experts de monopoliser le débat, ce qui aurait rendu inutile le fait de choisir des experts variés. La méthode choisie pour déterminer le risque associé à chaque type de contact concordait avec les opinions des experts lorsqu'il y avait un consensus et elle a été validée par une analyse de sensibilité en l'absence de consensus. Nous avons fait varier le poids relatif du contact au pâturage par rapport au contact *via* des blaireaux mais dans tous les cas la densité du réseau de contacts au pâturage est restée supérieure à celle du réseau de contact *via* des blaireaux. La valeur choisie initialement a donc été gardée. Cependant l'incertitude reste importante, surtout en ce qui concerne la faune sauvage. Cette incertitude est une incertitude générale qui s'est traduit par des réponses variées de la part des experts. Une étude plus approfondie avec éventuellement des expérimentations pourrait donc être utile.

2. RÉSULTATS ET CONSÉQUENCES OPÉRATIONNELLES

2.1. PLACE DU RÉSEAU DANS LA RÉGION

Le réseau représentant les contacts de bovins au

pâturage comprenait 24 contacts au sein de la zone, il s'agissait donc bien d'un réseau de voisinage. Pourtant, ces liens ne représentaient que 22 % des 111 contacts recueillis au cours des entretiens avec les éleveurs. La zone que nous avons étudiée n'est donc qu'une petite partie d'un plus grand réseau dont la taille est impossible à définir avec les données de l'étude. Les paramètres de réseaux que nous avons calculés ne correspondaient qu'aux liens étudiés entre les 22 nœuds de la zone : les indicateurs de connexion comme le degré et la taille des composants ont été sous-estimés car il existe en réalité d'autres liens entre ces nœuds de la zone et d'autres élevages qui auraient dû être pris en compte si on avait considéré un réseau plus grand. En termes « épidémiologiques », cela signifie que le risque couru ou représenté par chaque élevage (le degré) a été sous-estimé, de la même manière que l'extension maximale de la maladie si elle était introduite en un point du réseau (la taille des composants). À l'inverse, les indicateurs de morcellement comme le nombre d'isolats et de points d'articulation ont été surestimés. C'est-à-dire que d'éventuelles mesures de lutte, comme l'isolement d'un élevage stratégique (élevage qui serait un point d'articulation), ne seraient peut-être pas aussi efficaces que prévu. De même, le nombre d'élevages qui semblaient protégés car isolés au sein du réseau a été surestimé.

2.2. CONTACTS AU PÂTURAGE

Les élevages de la zone avaient en médiane des contacts au pâturage avec six autres élevages (de 0 à 15) dont un (de 0 à 7) au sein de la zone. Dans son étude en 2008 en Angleterre, Brennan avait trouvé une médiane de 3 (de 0 à 10). Les élevages avec le plus de contacts, c'est-à-dire les plus à risque étaient ceux qui avaient le plus de parcelles pâturées et le plus de rotation entre les pâtures. C'était donc les élevages avec de petites parcelles.

Dans notre étude, plus de 80 % des séparations entre pâtures qui ne permettaient pas le contact mufle à mufle entre bovins correspondaient à des chemins ou à des routes. Seuls quelques cas de doubles clôtures et de rotation de pâturage coordonnée avec un voisin pour éviter les contacts ont été rapportés. Il existe donc encore une grande marge de manœuvre pour limiter les contacts mufle à mufle au pâturage et donc limiter la probabilité de transmission d'une maladie par contact direct entre bovins au pâturage.

2.3. CONTACTS PAR LES DIVAGATIONS

Aux dires des éleveurs, 13 élevages sur les 22 de la zone ont été concernés par ce phénomène en 2010, en général une fois dans l'année. Certains éleveurs ont aussi dit avoir été concernés en 2009 ou en 2011 mais pas en 2010. Il semble donc que la divagation soit un accident qui arrive assez rarement (une fois par an ou tous les deux ans) mais dans de nombreux élevages. Tous les élevages sont donc à risque. Dans notre étude, la grande majorité des élevages reliés par des divagations l'étaient aussi par un autre type de contact, ce qui signifie que les divagations ont plus tendance à augmenter la force de contacts qui existent de toute manière qu'à créer de nouveaux contacts entre élevages non-voisins.

La gestion des divagations passe par deux mesures : d'une part, le bon entretien des clôtures pour empêcher les animaux de s'échapper et, d'autre part, une surveillance régulière des animaux au pâturage pour les rattraper au plus vite au cas où une divagation serait quand même arrivée. La surveillance peut se révéler difficile à mettre en place à certaines saisons pour des éleveurs qui sont souvent aussi cultivateurs. Elle est aussi plus difficile lorsque les pâtures sont très éloignées les unes des autres. L'entretien des clôtures passe par un respect des bonnes pratiques de la part de tous les éleveurs. En effet, la clôture qui sépare des parcelles de deux élevages différents n'appartient généralement qu'à l'un des deux éleveurs. C'est donc celui-ci qui est garant de l'absence de divagation pour lui ET son voisin.

2.4. CONTACTS VIA DES BLAIREAUX

Le réseau de contacts par les blaireaux a été construit comme une extension du réseau de pâturage dans les zones où des blaireaux étaient présents. Les élevages à risque étaient donc les mêmes que ceux à risque pour le voisinage de pâturage : ceux qui avaient des petites parcelles, et principalement ceux qui avaient des petites parcelles à proximité de bois.

Mais contrairement au voisinage de pâturage où on peut imaginer une entente entre les éleveurs pour éviter de mettre des animaux dans deux parcelles contigües au même moment, il est difficile de limiter les contacts entre les bovins et les excréments des blaireaux.

Par ailleurs, une meilleure estimation du risque nécessiterait des investigations plus poussées sur la densité de population des blaireaux, le nombre

et la localisation des latrines, la quantité de matériel infectant déposé dans ces latrines, la résistance de *M. bovis* dans les conditions climatiques de la Côte-d'Or, et le comportement des bovins lorsqu'ils ont des latrines sur leur zone de pâturage.

2.5. CONTACTS VIA DES SANGLIERS

Nous avons construit le réseau de contact *via* des sangliers en considérant tous les massifs forestiers comme identiques ce qui est faux : ils sont plus ou moins grands, il existe plus ou moins de ressources pour les sangliers, naturelles ou sous forme de points d'agraineage, et la pression de chasse est différente selon les endroits. De même, les ressources extérieures aux massifs forestiers sont variables : points d'eau, cultures, céréales, etc. Le réseau construit est donc très approximatif. Cependant, il représente bien les déclarations des éleveurs qui signalent presque tous le passage de sangliers dans leurs pâtures, accompagné de dégâts plus ou moins sévères. Compte tenu du paysage de la région (beaucoup de forêts), de la densité de population en sangliers et de la pression de chasse qui entraîne des déplacements massifs à certaines saisons, ce réseau semble donc assez approprié pour montrer que tous les élevages sont à risque de contact avec les sangliers, même si à chaque contact le risque de transmission de tuberculose est probablement faible.

En termes de structure, ce réseau avec beaucoup de liens répartis de manière assez homogène est celui qui ressemble le plus au type de population qu'on a l'habitude d'étudier en épidémiologie : une population parfaitement mélangée dans laquelle un élevage à la même probabilité d'être en contact avec tous les autres.

2.6. MATÉRIEL

Le partage de matériel représente un risque pour la tuberculose car la mycobactérie excrétée dans le mucus des bovins peut survivre sur ce matériel et contaminer un autre troupeau si le matériel n'est pas correctement nettoyé et désinfecté. Le nettoyage et la désinfection ont eu lieu dans moins de 50 % des cas dans notre enquête.

Dans notre étude, le partage de matériel concernait près de deux éleveurs sur trois. Un tiers des engins étaient partagés exclusivement entre des élevages de la zone. Les autres étaient partagés avec des élevages de communes voisines. Le réseau était très morcelé. Il s'agissait donc d'un

vrai réseau de voisinage proche. Isolément, ce réseau ne peut donc pas constituer une voie de transmission de la tuberculose à grande échelle. Mais il pourrait contribuer à entretenir une infection locale qui pourrait ensuite diffuser plus largement selon un autre réseau de contacts.

2.7. MISES EN PENSION

D'après les éleveurs interrogés, la mise en pension est une pratique peu fréquente par rapport à l'achat ou la vente de bovins. Elle était aussi différente du point de vue de la démarche de l'éleveur : dans notre étude, il s'agissait toujours d'un service rendu à une personne avec qui l'éleveur avait déjà travaillé et en qui il avait confiance. Il s'agissait soit d'un prêt en prévision d'un achat soit d'un prêt de taureau pour une saison de monte. Comme il s'agissait de pension de longue durée, le risque sanitaire lié à cette pratique était équivalent à celui d'un achat ou d'une vente. Malgré la différence entre les circonstances d'un achat et d'une prise de pension, il est donc essentiel de maintenir les mesures de gestion du risque lors d'une prise de pension.

Concernant cette donnée, on peut s'interroger sur la qualité de l'information recueillie. A une exception près, seules des pensions longues et officiellement déclarées nous ont été rapportées. Compte tenu de la nature de cet acte (service rendu à un collègue de confiance), il n'est pas exclu que l'échange d'animaux soit en réalité une pratique beaucoup plus courante, sous-déclarée et dont le risque serait alors peu maîtrisé.

2.8. RÉSEAU GLOBAL DE VOISINAGE PRENANT EN COMPTE TOUS LES TYPES DE CONTACTS

2.8.1. Importance de chaque type de contact

Selon que l'on pondère ou pas la densité du réseau en fonction du risque associé à chaque type de contact, l'importance d'un type de contact au sein du réseau global varie. Cela confirme le fait que l'évaluation du risque nécessite de prendre en compte plusieurs éléments, à savoir la probabilité de survenue du danger et les conséquences en cas de survenue. Nous nous sommes intéressés ici à l'évaluation des conséquences, ce que nous avons appelé le risque associé à chaque type de contact. Nous avons aussi étudié une partie de la probabilité de survenue en étudiant le nombre de contacts au cours d'une année. L'autre partie de la probabilité de survenue, à savoir la probabilité que

l'un des animaux en contact soit infecté de tuberculose, n'était pas du tout l'objet de cette étude. En effet, la construction du réseau de contact ne sert pas à déterminer la probabilité qu'un nœud soit infecté mais à évaluer les conséquences possibles, au cas où un nœud serait infecté, c'est-à-dire au cas où on introduirait *M. bovis* en un point du réseau.

Notons que le risque lié à l'introduction d'animaux dans les élevages était majeur, bien supérieur aux risques liés aux autres types de contacts de voisinage, mais aucun échange d'animaux n'a été rapporté dans la zone. Le réseau correspondant n'a donc pas pu être comparé aux autres.

2.8.2. Facteurs de risque vs moyens de maîtrise du risque

Dans ce réseau global de contact, les différents types de liens n'étaient pas indépendants : il s'agissait de différentes facettes d'un même phénomène, le voisinage. Au moins deux éléments sous-jacents doivent être pris en compte : la distribution géographique des parcelles (qui conditionne les contacts au pâturage, les divagations, les contacts via les blaireaux et sangliers) et l'entente entre les éleveurs (qui conditionne les contacts au pâturage, le partage de matériel et les échanges d'animaux lors de pension). D'un point de vue « évaluation et maîtrise du risque », cela signifie qu'un facteur de risque ou une pratique à risque pour l'un des types de contact envisagés l'est peut-être aussi pour un autre (ou tous les autres) types de contact. En revanche, les moyens de maîtrise du risque sont souvent ciblés sur un type de contact.

L'étude réalisée ici n'a pas permis de tester l'effet de mesures de lutte sur la topographie du réseau.

2.8.3. Diffusion d'une maladie dans un réseau complexe

Si les différents réseaux n'étaient pas indépendants, ils n'avaient pas non plus tous la même structure (certains comprenaient des individus à risque, d'autres pas). Or la structure du réseau a une influence sur la dynamique de propagation de la maladie [Christley *et al.*, 2005]. Le réseau global des contacts étant une superposition de ces différents réseaux, plusieurs modes de propagation de la tuberculose sont possibles : rapide à cause des individus à risque mais limitée quant au nombre total d'élevages atteints, lente mais touchant beaucoup d'élevages

ou encore (ce qui semble le plus probable), une combinaison de plusieurs modèles, la maladie se propageant tantôt grâce à un réseau, tantôt grâce à un autre. Les liens les plus à risque (blaireau, contact au pâturage) sont sûrement favorisés mais

ne constituent pas une source exclusive de contacts et donc de propagation potentielle de la maladie. Cela peut prêter à confusion sur le terrain !

V - CONCLUSION

Le réseau issu de cette enquête a montré que les contacts de voisinage, avec les autres élevages ou avec la faune sauvage, pouvaient expliquer la circulation de *M. bovis* dans toute la zone étudiée. Cela confirme le fait que la zone est « à risque » pour la tuberculose bovine. En fonction de leur nature, les différents types de contacts étudiés ne présentaient pas le même risque pour la transmission de la tuberculose. Ce rapport des risques entre les différents contacts étudiés était mal documenté. Des experts français ont été consultés mais la diversité de leurs réponses initiales et l'absence de consensus parfait à la fin de la consultation ont confirmé l'incertitude à ce sujet. Un modèle de pondération des contacts en fonction de leur durée a été décrit mais il reste fragile en l'absence d'études complémentaires sur la survie de *M. bovis* et le comportement des bovins à l'occasion de contacts intra et interspécifiques dans les conditions environnementales de la Côte-d'Or.

Le réseau de contacts avec les sangliers était un réseau dense et homogène : tous les élevages étaient concernés. Les réseaux de contacts directs au pâturage et de contacts avec les blaireaux étaient plus hétérogènes : les élevages avec de petites parcelles étaient les plus à risque. Ces trois

types de liens représentaient environ 95 % du total des contacts entre les élevages. D'autres types de contacts intervenaient moins fréquemment : l'utilisation de matériel agricole en commun (qui concerne régulièrement un petit nombre d'exploitations) et les divagations (qui concernent tous les élevages mais rarement). Au sein de la zone dans la période étudiée, les rassemblements d'animaux, échanges d'animaux ou prêts d'herbe n'ont pas joué de rôle. Les différents réseaux étudiés étaient tous liés les uns aux autres sans toutefois se recouvrir totalement. L'étude du voisinage d'une exploitation nécessite donc absolument de prendre en compte au moins tous les contacts envisagés ici.

Certaines pratiques d'élevages permettent de limiter les contacts avec le voisinage mais il est difficile de les éviter totalement. Par ailleurs, l'étude a montré que le risque lié à l'introduction d'animaux dans les élevages était majeur, bien supérieur aux risques liés au voisinage. Contrairement aux contacts de voisinage, le risque lié à l'introduction peut être correctement maîtrisé en respectant certaines mesures réglementaires : tuberculination et introduction depuis un cheptel indemne.

BIBLIOGRAPHIE

Anderson J.G., Jay S.J. - Computers and clinical judgment : the role of physician networks. *Soc. Sci. Med.* , 1985, **20**, 969-979.

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. *Épidémiologie et Santé Animale*, 2006, **50**, 127-143.

Brennan M.L., Kemp R., Christley R.M. - Direct and indirect contacts between cattle farms in north-west England. *Prev. Vet. Med.*, 2008, **84**, 242-260.

Christley R.M., Pinchbeck G.L., Bowers R.G., Clancy D., French R.P., Bennett R., Turner J. - Infection in social networks: using network analysis to identify high-risk individuals. *Am. J. Epidemiol.*, 2005, **162**, 1024.

EFSA, 2008- The community summary report on trends and sources of Zoonoses, Zoonotic agents and food-borne outbreaks in the European Union in 2008. EFSA J. 1496. URL : <http://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/1496.pdf> (consulté le 18 avril 2014).

Humblet M.F., Boschioli M.L., Saegerman C. - Classification of worldwide bovine tuberculosis risk factors in cattle- a stratified approach. *Vet. Res.*, 2009, **40**, 50.

Klovdahl A.S. - Social networks and the spread of infectious diseases- the AIDS example. *Soc. Sci. Med.*, 1985, **21**, 1203-1216.

Wasserman S., - Social Network Analysis: Methods and Applications, 825 pages, Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

Webb C.R - Farm animal networks- unraveling the contact structure of the British sheep population. *Prev. Vet. Med.*, 2005, **68**, 3-17.



Remerciements

À tous les éleveurs qui ont accepté de donner de leur temps pour cette étude ainsi qu'aux membres du GDS et de la FRGDS qui ont aidé à la planifier.