

Vulnérabilité du réseau d'échanges d'animaux face à la diffusion de **maladies infectieuses** : approche méthodologique appliquée au réseau d'élevages bovins français

Séverine Rautureau (1) (severine.rautureau@agriculture.gouv.fr), Barbara Dufour (2), Benoît Durand (3)

(1) Direction générale de l'alimentation, Bureau de la santé animale, Paris

(2) ENVA, Unité de recherche d'épidémiologie des maladies animales infectieuses (EPIMA), Maisons-Alfort

(3) Anses, Laboratoire de santé animale de Maisons-Alfort

Résumé

Les mouvements d'animaux forment un réseau complexe reliant les exploitations entre elles et représentent un risque important de dissémination d'agents infectieux entre établissements d'élevage et ce, sur de longues distances. En utilisant les méthodes d'analyse des réseaux sociaux, le réseau de mouvements de bovins à travers la France a été étudié, dans le but de déterminer des caractéristiques qui pourraient avoir des implications pour la diffusion d'épizooties.

Dans cet objectif, des sous-groupes d'établissements de grande taille fortement connectés entre eux, les « giant strong components » (GSC) ont été analysés. Ces GSCs représentent des vulnérabilités structurelles du réseau d'élevages français vis-à-vis d'un risque épidémique, de façon permanente et sur tout le territoire. Les conditions permettant d'éviter leur formation afin de diminuer la vulnérabilité du réseau ont été alors étudiées. L'analyse des flux passant par les marchands (centres de rassemblement et marchés) a montré qu'une action de maîtrise des flux ciblant à la fois les deux types d'établissements était nécessaire. Mais un ciblage sur des établissements selon leur « centralité » (positionnement) dans le réseau était plus pertinent et efficace en termes de nombre d'établissements à surveiller.

Mots clés

Analyse de réseaux sociaux, mouvements de bovins, diffusion de maladie

Abstract

Vulnerability of animal trade networks to the spread of infectious diseases: a methodological approach applied to evaluation and emergency control strategies in cattle
Animal movements form complex networks linking holdings and represent a major risk for the dissemination of infectious agents between farms. Using social network analysis methods, the network of cattle movements throughout France was studied to identify features that could have important implications for the spread of disease.

For that purpose, large cohesive sub-groups known as 'giant strong components' (GSC) were analysed; these sub-networks are a cause of permanent and nation-wide structural vulnerability in the French cattle trade regarding the risk of epidemics. Ways of preventing the creation of GSCs were studied, in order to reduce network vulnerability. An analysis of flow via dealers and markets showed that control measures were necessary in both situations. However, targeting holdings based on their centrality within circuits was found to be more relevant and more efficient in terms of the number of sites to be monitored.

Keywords

Social network analysis, cattle movement, disease spread

Les mouvements d'animaux représentent la principale voie de transmission de maladies contagieuses d'élevage à élevage. Les épizooties de fièvre aphteuse du Royaume-Uni en 2001 ou de peste porcine classique aux Pays-Bas en 2003 ont clairement confirmé le rôle des mouvements d'animaux dans la diffusion des maladies. Ces événements attirent non seulement l'attention sur un risque de diffusion de maladies à bas bruit lors d'échanges de routine mais soulignent également la vulnérabilité de cette organisation face à la diffusion de maladies.

Par ailleurs, le renforcement du processus de maîtrise de la traçabilité et d'identification des animaux (initié dans la filière bovine par la directive 92/102/CEE⁽¹⁾) traduit par l'inventaire des établissements d'élevage et des animaux et par l'enregistrement des mouvements d'animaux entre ces exploitations permet désormais de fournir des informations riches sur lesquelles fonder des analyses. La France dispose, à ce titre, d'une base de données nationale d'identification, la BDNI.

La méthode d'analyse de réseaux sociaux (SNA pour « *social network analysis* ») peut être utilisée pour étudier le risque de diffusion de maladies dans des réseaux composés d'établissements d'élevages et de mouvements d'animaux. Cette méthode, à l'origine une application à la sociologie de la théorie mathématique des graphes, se centre sur les

relations et contacts entre acteurs pour pouvoir détecter et interpréter leurs rôles dans la structure. Un réseau est composé de nœuds qui sont les entités d'étude et de liens, relations que l'on étudie. L'analyse structurale des réseaux sociaux caractérise les réseaux en calculant des indicateurs pour les nœuds et leurs relations indiquant leur place et leur rôle dans le réseau [1]. Des applications sont désormais réalisées dans des domaines très variés de l'éthologie aux échanges Internet, aux connexions cellulaires ou métaboliques. En épidémiologie, cet outil d'analyse des réseaux sociaux est de plus en plus utilisé à commencer par la médecine humaine pour des maladies telles que le SIDA ou la tuberculose qui impliquent des contacts étroits entre personnes.

En médecine vétérinaire, la discipline est plus récente [2, 3] et a débuté notamment par l'étude des mouvements d'animaux. Ces échanges ont été analysés pour évaluer le potentiel de transmission d'une maladie infectieuse à travers un réseau de contacts ou pour évaluer l'impact de restriction de mouvements dans ces réseaux. Ces transferts d'animaux reliant les exploitations entre elles forment un réseau complexe à travers lequel les agents pathogènes se propagent utilisant les animaux en mouvement comme liens entre les entités. La diffusion de la maladie est par conséquent très dépendante de la structure du réseau et cette topologie peut mettre en évidence l'existence de groupes

(1) Directive 92/102/CEE du Conseil du 27 novembre 1992 concernant l'identification et l'enregistrement des animaux.

d'établissements particulièrement exposés à l'infection, définissant des entités vulnérables. À l'échelle d'un réseau, la vulnérabilité face à une maladie infectieuse représenterait les mouvements à travers ce réseau pouvant favoriser la diffusion de maladies. Il est alors intéressant d'étudier plus précisément l'organisation de ces échanges; le réseau d'élevage est-il par son organisation vulnérable face à la diffusion de maladies? Favorise-t-il cette diffusion?

Une description de l'organisation de la filière bovine et l'étude de sa structure par l'analyse de réseau ont pu être ainsi réalisées permettant de caractériser les relations entre établissements et d'analyser cette vulnérabilité structurale vis-à-vis de la diffusion de maladies en termes d'indicateurs « réseau » [4].

Matériels et méthodes

Création de réseaux

Les données sur les établissements français détenant des bovins et celles portant sur les flux de bovins ont été extraites de la base de données nationale de l'identification (BDNI) pour l'année 2005, année non perturbée par des restrictions de mouvements dues à la présence de fièvre catarrhale ovine sur le territoire. Chaque détenteur doit notifier chaque événement de la vie d'un bovin. Ainsi nous avons collecté trois jeux de données « détenteurs » avec l'ensemble de leurs notifications: les élevages, les centres de rassemblements et les marchés. L'ensemble de ces données (plus de 40 millions d'événements) ont permis de reconstituer et d'étudier les transferts de bovins entre établissements pour chacun des jours de l'année 2005.

En termes de réseau, chaque établissement (élevages, marchés et centres de rassemblement) a été assimilé à un « nœud » et les mouvements à des « liens » en tenant compte du sens des mouvements. Pour l'étude, un lien correspondait à au moins un échange entre deux exploitations réalisé au cours de la période étudiée. Les mouvements liés à l'importation ou à l'exportation d'animaux ont été exclus de l'étude ainsi que ceux vers les abattoirs qui représentent peu de risques dans la diffusion de maladies entre animaux. Le réseau a été étudié à différentes échelles de temps: annuelle, mensuelle et hebdomadaire.

Analyse de réseaux d'échanges

La méthode d'analyse de réseaux sociaux a été appliquée classiquement par le calcul d'indicateurs de réseaux et de centralité pour les nœuds et par la détection de sous-groupes [1]. La description des principaux indicateurs utilisés dans cette étude est résumée dans le [Tableau 1](#). Les réseaux ont ensuite été comparés entre eux selon le pas de temps considéré (annuel/mensuel/hebdomadaire).

Caractérisations des réseaux

Une présentation générale des réseaux construits a tout d'abord été établie par des mesures simples de nombre de nœuds et de liens et

par une distribution des nombres de liens par nœud (degrés). Cette distribution de degrés a permis de qualifier le réseau de « *scale-free* » et de déduire des particularités structurales du réseau et l'influence de certains nœuds.

Puis, nous nous sommes intéressés à l'existence de groupes d'établissements, en nombre conséquent, tous connectés entre eux, ce qui peut représenter une structure à risque face à la diffusion de maladie. Ces sous graphes étudiés étaient des composants fortement connectés (SC, pour « *strong component* »). À l'intérieur de ces groupes, chaque entité peut être accessible par chacun des autres établissements en suivant le sens des mouvements d'animaux. Pour chaque réseau construit, la recherche de ces sous-groupes a été faite et leur nombre ainsi que la taille des deux plus grands ont été calculés. Ainsi, il a pu être mis en évidence la présence de sous-groupes de grande taille se distinguant des autres et appelés « géants ». Ensuite, les composants géants fortement connectés (GSC, « *giant strong component* ») ont fait l'objet d'une étude plus détaillée.

Études de sous-graphes fortement connectés: 'GSC'

L'étude structurale des GSCs a été réalisée avec des indicateurs classiques: nombre de nœuds et de liens, degré moyen (nombre moyen de liens par nœud) et nombre moyen de liens entre deux nœuds (en suivant les chemins le plus court) ([Tableau 1](#)). La répartition géographique de ces sous-graphes GSC a été étudiée. Ont été représentés les GSCs hebdomadaires et mensuels les plus petits et les plus grands.

Au sein du GSC annuel, des mesures de centralité courantes (degré, proximité, intermédialité) ont été calculées pour chaque type d'établissements [5, 6] ([Tableau 1](#)).

Puis, on s'est intéressé à l'identification des fragilités structurales des réseaux afin de modifier leurs caractéristiques [7]. Par leurs propriétés, les réseaux de type « *scale-free* » présentent une robustesse aux « attaques » dites aléatoires (ils conservent leur structure avec la majorité des liens). Par contre, une « attaque » ciblée notamment visant des nœuds fortement connectés, les « hubs », déstructure plus facilement ces réseaux, les fragmente et leur fait perdre leurs propriétés et activité [7]. Ces « attaques » ont été réalisées suivant des procédures de retrait de nœuds.

Quatre procédures consistant en des retraits de nœuds ciblés ont été testées (selon le type et les mesures de centralité des nœuds) pour déterminer la plus efficace permettant de ne pas voir se former un GSC. La disparition de GSC a été définie quand après les retraits de nœuds, la taille du plus grand SC était inférieure à un seuil prédéfini, ici 51. Cette taille correspondait au plus grand SC secondaire observé dans les réseaux entiers hebdomadaires (avant le retrait de nœuds).

Tout d'abord, tous les marchés ou tous les centres de rassemblements et enfin les deux opérateurs commerciaux ont été retirés des réseaux.

Tableau 1. Indicateurs d'analyse de réseau et interprétation en terme de diffusion de maladie

	Définitions	Implication en épidémiologie
Degré ('Degree')	Nombre de liens adjacents à un nœud	Nombre de mouvements d'entrée et de sortie. Elle reflète l'activité commerciale directe de l'exploitation. Un établissement a haute centralité (= 'hub') sera à la fois plus vulnérable mais aussi facilitera la diffusion de la maladie par une dispersion plus large
Distance moyenne ('The average path length')	Longueur du plus court chemin reliant deux nœuds; moyenne de ces plus courts chemins.	Informe de la distance (nombre de mouvements et d'exploitations intermédiaires) entre deux exploitations. Ces indicateurs sont en relation avec la vitesse de diffusion d'une maladie
Diamètre	Chemin le plus long	Informe de la distance (nombre de mouvements et d'exploitations intermédiaires) entre deux exploitations. Ces indicateurs sont en relation avec la vitesse de diffusion d'une maladie
Proximité ('Closeness')	Inverse de la somme des distances reliant deux nœuds	Permet de mesurer la capacité d'autonomie ou d'indépendance des acteurs
Intermédialité ('Betweenness')	Proportion de chemins (les plus courts) sur lequel se trouve le nœud étudié	Un établissement a haute intermédialité (= 'hub') sera à la fois plus vulnérable mais aussi facilitera la diffusion de la maladie car se situe à un carrefour au niveau commercial plutôt incontournable mais a aussi capacité de contrôler cette circulation
Composant fortement connecté ('Strong component') SC	Un SC est un sous-réseau pour lequel un chemin existe entre chaque paire de nœud où la direction des liens est prise en compte	Structure vulnérable face à la diffusion de maladie = sous groupe de nœuds très cohésifs Les SC sont étudiés comme prédateurs de la taille finale d'une épizootie

Après ces retraits de nœuds en masse, la présence de GSC a été recherchée (SC de taille supérieure à 51).

Puis, les nœuds à plus forte centralité (degré, proximité et intermédiarité) ont été éliminés un à un et l'émergence de GSC a été examinée jusqu'à l'obtention d'un SC de taille inférieure à 51. Les indicateurs de centralité ont été recalculés et les nœuds classés entre chaque éviction.

Les analyses ont été réalisées avec les logiciels suivants: Pajek, programme pour les analyses de réseaux de grande taille (v1.25, <http://pajek.imfm.si/doku.php?id=pajek>) et le package Igraph du logiciel R (v 0.5.2, <http://igraph.sourceforge.net>).

Résultats

Le réseau d'échanges bovins français

Un total de 265 298 établissements a été répertorié composé de 263 907 élevages, 1 315 centres de rassemblement et 76 marchés.

Sur les 27 millions de bovins différents présents pendant l'année 2005, 10 millions (36 %) s'étaient déplacés au moins une fois d'un établissement à un autre. La moitié de ceux-ci n'avait bougé qu'une seule fois, le nombre moyen de mouvements par animal étant de 1,8 (de 1 à 24). Ont été ainsi enregistrés 18 millions de mouvements individuels correspondant à environ 6 millions de mouvements de lots d'animaux. Plus de la moitié des mouvements individuels étaient des mouvements d'import/export ou vers l'abattoir (Tableau 2). Le reste, soit 5 028 522 mouvements individuels, correspondaient à des transferts entre élevages et/ou opérateurs commerciaux (marchés et centres). Dans 57 % des cas, les élevages avaient acheté leurs animaux via un opérateur et dans 75 % des cas les avaient vendus de la même façon. La distance médiane de transit pour un bovin était de 35 km (33 km si le transfert était direct d'élevage à élevage 80 km via un opérateur). Cette différence était significative (test de Wilcoxon, $p < 0,001$).

Tableau 2. Mouvements de bovins entre établissements, en milliers d'animaux en 2005

Origines	Destinations			
	Élevages (% total des origines)	Centres (% total des origines)	Marchés (% total des origines)	Autres* (% total des origines)
Élevages	1 542 (14)	3 931 (34)	797 (7)	5 148 (45)
Centres	1 595 (30)	884 (16,5)	453 (8,5)	2 428 (45)
Marchés	429 (33,5)	508 (40)	NA (-)	341 (26,5)
Import	122 (55)	39 (17)	27 (12)	35 (16)
Total des destinations	3 688 (20)	5 361 (29)	1 277 (7)	7 951 (44)

* Autres: exports, abattoirs et équarissements.

Analyse de réseaux d'échanges

Caractérisation des réseaux

Le réseau annuel étudié comportait 244 097 nœuds et 1 416 208 liens. La quasi-totalité des élevages bovins recensés (92 %) et la totalité des opérateurs commerciaux avaient effectué un échange dans l'année. Un réseau mensuel comportait en moyenne 126 613 nœuds (environ 50 % des nœuds et 15 % des liens du réseau annuel), un réseau hebdomadaire 20 % des nœuds et 4 % des liens du réseau annuel (Tableau 3). Ces opérateurs commerciaux étaient presque toujours présents dans les réseaux mensuels (85 % des centres et 92 % des marchés) et dans les réseaux hebdomadaires (76 % des centres et 86 % des marchés) alors que les élevages étaient proportionnellement moins impliqués (49 % pour les réseaux mensuels et 20 % pour les hebdomadaires).

La distribution des degrés des établissements (nombre de liens) avait une forme en « comète » caractéristique (Figure 1). Ce résultat suggère que la croissance du réseau d'échanges était conduite par un

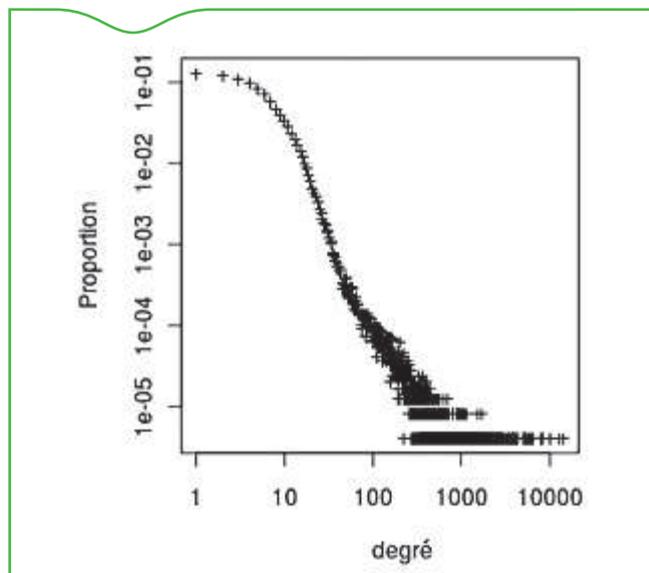


Figure 1. Distribution des degrés du réseau annuel de mouvements bovins en 2005

attachement préférentiel des nœuds formant ainsi un réseau « *scale-free* » : quand un nœud est ajouté (ici, quand un établissement achète ou vend des animaux), il tend à se connecter à des nœuds fortement connectés (ici, un établissement a tendance à acheter ou vendre des animaux à des établissements qui achètent ou vendent beaucoup d'animaux). Une hiérarchie entre les nœuds apparaît; un petit nombre de nœuds très connectés dénommés « échangeurs » ou « hubs », puis un nombre de plus en plus important de nœuds moyennement ou peu connectés. Ces derniers forment des sous-réseaux passant en général par les « hubs » pour communiquer avec d'autres sous-réseaux. Les « hubs » sont des nœuds jouant des rôles centraux (fortes mesures de centralité) dans la connectivité.

De larges SC que l'on a pu considérer comme des géants ont été détectés; leurs tailles en moyenne de 10 277 établissements pour les réseaux mensuels et de 2 115 pour les hebdomadaires étaient toujours nettement supérieures ($>10^3$ plus grand) à celle des autres SC respectivement en moyenne de sept et neuf établissements (bornes de 4 à 51).

Étude des GSCs

Des GSCs ont été observés pour les différents pas de temps d'étude et le détail de leurs caractéristiques est décrit dans le Tableau 3. Quel que soit le réseau étudié, deux établissements étaient en moyenne séparés par approximativement cinq mouvements d'animaux et donc quatre établissements. La plus longue distance (i.e. le diamètre) variait de 14 liens (réseaux hebdomadaires) à 20 liens (réseau annuel).

Des fluctuations saisonnières des flux dans les tailles des GSCs ont été observées; le GSC mensuel de novembre était composé de 12 652 nœuds au total alors que celui du mois de juillet de 7 254 nœuds. La semaine 47 (semaine du mois de novembre) impliquait le plus grand nombre d'établissements (2 657) et la semaine 33 (semaine du mois de juillet) le moins (1 200 nœuds). La répartition géographique des GSCs montrait qu'ils étaient systématiquement largement répartis sur l'ensemble du territoire et couvraient les principales zones d'élevage (Figure 2).

Par ailleurs, les marchés et les centres se distinguaient par des mesures de centralité plus élevées que les élevages (Figure 3). De ce fait, ces établissements correspondaient aux hubs d'un réseau « *scale-free* ». Leur implication était importante car parmi les 932 établissements se retrouvant systématiquement dans les GSCs mensuels, 610 étaient des opérateurs (soit 65 % des établissements). Pour les GSCs hebdomadaires, 43 établissements étaient présents systématiquement dont 42 marchands.

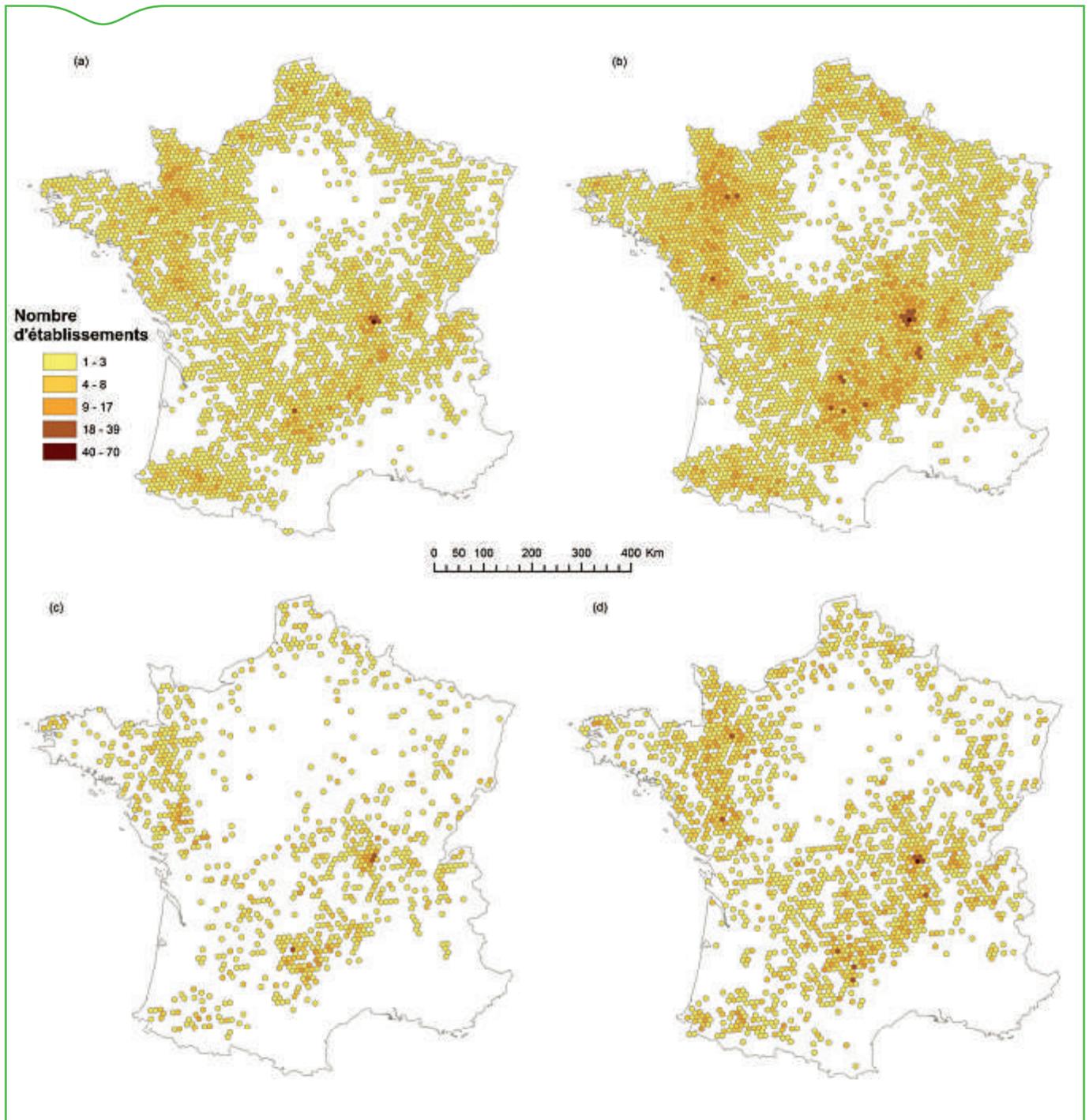


Figure 2. Répartition géographique des établissements d'élevage détenant des bovins et participant à des GSCs en 2005. (a) le mois de juillet (7 254 établissements); (b) le mois de novembre (12 652 établissements); (c) la semaine 33 (1 200 établissements); (d) la semaine 47 (2 657 établissements)

La présence de ces sous-graphes de typologie « *scale-free* » a finalement conduit à une étude de déstructuration de ces sous-réseaux.

Le fait d'enlever les opérateurs commerciaux sur le réseau d'échange bovin annuel n'a pas permis l'émergence d'un GSC de petite taille (taille du GSC obtenu: 41 588 nœuds). Par contre, cette procédure a été efficace pour les réseaux mensuels et hebdomadaires (Tableau 4). En effet, suite à la suppression de tous les opérateurs, aucun GSC de taille supérieure à 51 nœuds n'a été détecté, ce qui n'était pas le cas si seulement un des deux types d'opérateurs était maintenu.

Cette même procédure de retrait de nœuds a été menée selon les valeurs de mesures de centralité et a permis de limiter l'apparition de GSCs en évinçant, pour la procédure la plus satisfaisante, en moyenne 299 établissements pour les réseaux mensuels et 82 pour les réseaux hebdomadaires (Tableau 4). Cela représentait moins de 1 %

de la population impliquée dans la période d'étude. Cette procédure basée sur les mesures de centralité a permis de réduire le nombre d'établissements à cibler par rapport à la procédure impliquant le retrait de la totalité des opérateurs. Cependant, ces derniers étaient largement représentés; de 35 à 56 % des marchés et de 6 à 23 % des centres.

Discussion

Les établissements hébergeant des bovins (élevages, centres et marchés) formaient ainsi les points ou sommets du réseau d'élevages bovins français. Face à la diffusion de maladies infectieuses, ce réseau d'établissements reliés par les mouvements d'animaux montrait une vulnérabilité constante et largement répartie sur tout le territoire.

Tableau 3. Description des réseaux d'échanges bovins de 2005 (annuel, mensuels et hebdomadaires)

	Réseau annuel	Réseaux mensuels	Réseaux hebdomadaires
		Données moyennes [minimum-maximum]	Données moyennes [minimum-maximum]
Taille totale	244 097	126 613 [106 141-139 650]	49 246 [33 848-59 675]
Élevages	242 706	125 427 [104 976-138 473]	48 179 [32 920-58 605]
Centres	1 315	1 115 [1 091-1 145]	1 001 [865-1 042]
Marchés	76	71 [67-75]	66 [57-73]
Liens	1 416 208	212 497 [168 423-245 560]	59 933 [35 984-73 401]
SC*			
Nombre	1 259	362 [268-477]	125 [86-178]
Le plus grand (%)	108 904 (45 %)	10 277 (8,1 %) [7 254 (6,8%) - 12 652 (9,2 %)]	2 115 (4,3 %) [885 (2,6 %) - 2 657(4,8%)]
2 ^e plus grand	9	7 [5-14]	9 [4-51]
Détail GSC*			
Taille	108 904	10 277 [7 254-12 652]	2 115 [885-2 657]
Élevages	107 539	9 245 [6 277-11 622]	1 430 [524-1 885]
Centres	1 289	964 [908-1 008]	633 [320-714]
Marchés	76	69 [65-73]	52 [39-60]
Liens	804 331	39 592 [29 726-47 581]	7 417 [2 655-9 485]
Indicateurs de réseau			
Degré moyen	11,6	3,35 [3,17-3,55]	2,43 [2,13-2,52]
Distance la plus courte	4,44	4,74 [4,6-4,82]	5,07 [4,84-6,24]
Diamètre	20	16 [13-20]	14 [12-19]

* SC = Strong component, GSC = Giant strong component.

L'analyse de réseau (SNA) offre un large panel d'outils pour étudier les réseaux d'élevages. Notre choix s'est porté avant tout sur l'étude de structures à risque simples, des sous-groupes d'établissements fortement connectés, les GSCs. La cohésion des établissements dans ces sous-groupes permet d'approcher un risque de vulnérabilité de diffusion de maladie. La prise en compte du sens des mouvements dans les GSCs précise le risque même si leur chronologie n'est pas

conservée mais seulement approchée par un découpage en mois et en semaine. Mais ces différentes échelles de temps ont permis d'étudier cette vulnérabilité face à différents types de maladies (différentes selon leur vitesse de diffusion).

L'étude a permis de qualifier le réseau de mouvements de bovins français de réseau « *scale-free* » et d'identifier l'influence de certains nœuds dans le réseau. De nombreux réseaux réels sont des réseaux « *scale-free* ». Cette topologie est assez commune et a été déjà décrite pour les mouvements de bovins dans d'autres pays d'Europe; par exemple, au Royaume-Uni [8], en Italie [9], au Danemark [10] et en Suède [11].

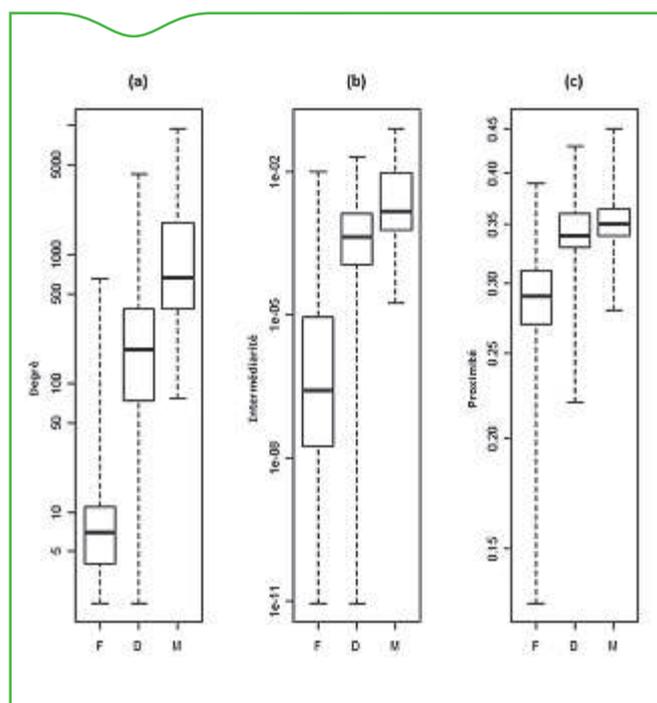


Figure 3. Mesures de centralité des établissements du réseau d'échanges bovin: (a) degré, (b) intermédiarité, (c) proximité. Mesures de centralité pour les élevages (F), les centres de rassemblement (D) et les marchés (M)

Tableau 4. Nombre d'établissements retirés pour obtenir la disparition des GSC dans les différents réseaux d'échanges bovins, 2005

Procédures de retrait de nœuds/établissements				
	Échelle de temps	Nombre de nœuds retirés (%*)		
		Élevages	Centres	Marchés
Selon le type d'établissements	Mensuel	-	964 (86 %)	69 (97 %)
	Hebdomadaire	-	633 (63 %)	52 (79 %)
Selon la centralité de degré 'Degree'	Annuel	2 322 (1,0 %)	1 113(85 %)	75 (100 %)
	Mensuel	3	351 (31 %)	48 (68 %)
	Hebdomadaire	-	83 (8 %)	29 (44 %)
Selon la centralité de proximité 'Closeness'	Annuel	2 805 (1,1 %)	1 073 (82 %)	75 (100 %)
	Mensuel	55	295 (26 %)	46 (65 %)
	Hebdomadaire	10	79 (8 %)	24 (36 %)
Selon la centralité d'intermédiarité 'Betweenness'	Annuel	1 766 (0,7 %)	1 035 (79 %)	75 (100 %)
	Mensuel	8	251 (23 %)	40 (56 %)
	Hebdomadaire	1	59 (6 %)	23 (35 %)

* Pourcentage par catégorie ou global de nœuds évincés du réseau (moyennes pour les réseaux mensuels et hebdomadaires).

Par ailleurs, les opérateurs commerciaux se sont distingués par leurs fortes valeurs de centralité; les centres et les marchés avaient une place centrale dans le réseau de mouvements de bovins en France. Leur rôle dans les réseaux de mouvements d'animaux est bien incontestablement celui de « hubs » ou d'intermédiaires incontournables dans de nombreux flux [12]. Il était alors intéressant d'agir en partie sur ces établissements par une action (ou « attaque ») ciblée pour limiter la vulnérabilité du réseau. Cette étude a permis de démontrer qu'une action générale sur l'ensemble des centres et des marchés était nécessaire pour désorganiser le réseau et contrôler sa vulnérabilité. Cette application systématique de mesures de lutte ou de prévention apparaît toutefois difficilement réalisable et, sur du long terme, entrave lourdement le commerce.

Par contre, la suite de l'étude a permis de préciser ces actions en sélectionnant les nœuds selon leurs mesures de centralité au sein du réseau. Une pression de surveillance ou une limitation de mouvements temporaire sur un plus faible nombre d'établissements par rapport à un ciblage par catégorie d'activité peut suffire à déconnecter le réseau et donc à limiter un risque de large diffusion de maladies.

Bien sûr, pour cela, il faut une action rapide puisque ces indicateurs se placent dans un réseau donné et que tout événement notable (mesures de prévention ou lutte) survenant par la suite recrée un nouveau réseau; des établissements sont isolés, fermés, les réseaux commerciaux cessent leur activité ou se réorganisent.

Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence une vulnérabilité constante du réseau d'échanges bovins *via* l'existence des GSCs, structures à risque facilitant la diffusion de maladies. Limiter leur importance permet de diminuer un risque de large diffusion par le biais de mouvements d'animaux. Pour cela, l'étude a suggéré de cibler les mesures de lutte et de prévention sur un faible nombre d'établissements grâce à des indicateurs empruntés à la méthode d'analyse de réseaux sociaux (SNA). Une partie des marchands (centres et marchés) par leur fonctionnement de rassemblement et de redistribution d'animaux ont été naturellement visés. Ce ciblage permet de proposer une stratégie optimale pour le déploiement des ressources sans entraver trop lourdement les flux commerciaux.

Références bibliographiques

- [1] Wasserman S. F., K. (1994) *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge: 825 pp.
- [2] Dube C., Ribble C., Kelton D., McNab B. (2009) A review of network analysis terminology and its application to foot-and-mouth disease modelling and policy development. *Transbound Emerg Dis*, 56(3): 73-85.
- [3] Martinez-Lopez B., Perez A. M., Sanchez-Vizcaino J. M. (2009) Social network analysis. Review of general concepts and use in preventive veterinary medicine. *Transbound Emerg Dis*, 56(4): 109-120.
- [4] Rautureau S., Dufour B., Durand B. (2011) Vulnerability of Animal Trade Networks to The Spread of Infectious Diseases: A Methodological Approach Applied to Evaluation and Emergency Control Strategies in Cattle, France, 2005. *Transbound Emerg Dis*, 58(2): 110-120.
- [5] Sabidussi G. (1966) The centrality of a graph. *Psychometrika*, 31(4): 581-603.
- [6] Freeman L. C. (1978/1979) Centrality in social networks, conceptual clarification. *Soc. Networks*, 1: 215-239.
- [7] Albert R., Jeong H., Barabasi A. L. (2000) Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406(6794): 378-382.
- [8] Christley R. M., Robinson S.E., Lysons, R., French, N. (2005) Network analysis of cattle movement in Great Britain. *Proc. Soc. Vet. Epidemiol. Prev. Med*: 234-243.
- [9] Natale F., Giovannini A., Savini L., Palma D., Possenti L., Fiore G., Calistri P. (2009) Network analysis of Italian cattle trade patterns and evaluation of risks for potential disease spread. *Prev Vet Med*, 92(4): 341-350.
- [10] Bigras-Poulin M., Thompson R. A., Chriel M., Mortensen S., Greiner M. (2006) Network analysis of Danish cattle industry trade patterns as an evaluation of risk potential for disease spread. *Prev Vet Med*, 76(1-2): 11-39.
- [11] Nöremark M., Hakansson N., Lewerin S. S., Lindberg A., Jonsson A. (2011) Network analysis of cattle and pig movements in Sweden: measures relevant for disease control and risk based surveillance. *Prev Vet Med*, 99(2-4): 78-90.
- [12] Robinson S. E., Christley R. M. (2007) Exploring the role of auction markets in cattle movements within Great Britain. *Prev Vet Med*, 81(1-3): 21-37.

Le *Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation* est désormais consultable sur Internet.

Recherchez un article
du *Bulletin épidémiologique* sur:
www.anses.fr/bulletin-epidemiologique/index.htm

Titre de l'article	N° Bulletin	Date	Auteurs	Sommaire / Mots-clés
État sanitaire du sanglier vis-à-vis de la transmission de la maladie d'Aujeszky, de la brucellose, de l'hydatidose et des virus influenzae porcins en France	BSE4- Article 1	1/07/11	Ariane Puyne, Sophie Roué, Sandrine A. Lécuyer, Isabelle Vialat, Bruno Geste, Isabelle Schan, Sandrine Héran, Nicolas Péro, Céline Riquelme, Charlotte Durand, Véronique Bouver, Alain Hays	Sanglier, Trichinella, maladie d'Aujeszky, brucellose, virus influenzae porcins, évaluation du risque
Sérum - Test d'infection alimentaire collective à Salmonella Enteritidis suite à la consommation de viande de sanglier	BSE4- Article 1	1/07/11	Nikola Vukob, Sandrine Lécuyer, Pascal Bédère	Trichinella, sangliers, zoonose
Sérum - Secondes épidémies humaines vis-à-vis de la viande de sanglier en France	BSE4- Article 2	1/07/11	Isabelle Vialat, Sandrine Lécuyer, Pascal Bédère	Alaria sp., sangliers, amargosa
Sérum - Test d'infection alimentaire collective à Salmonella Enteritidis suite à la consommation de viande de sanglier	BSE4- Article 3	1/07/11	Françoise Rogier, Pierre Bédère, Thomas Le Hello, Anne-Lise The, Odette Rey, Sandrine Héran, Sandrine Vialat, Françoise Mary, Françoise Kater, Valérie Haillet, Armand	Sau-attrahé alimentaire collective (SAC), Salmonella Enteritidis, sanglier
Duché - Rapport de l'Union européenne sur les tendances en la hausse des zoonoses et des maladies infectieuses en 2008	BSE4- Article 1	1/07/11		Zoonoses, Union européenne, SAC, infection alimentaire