



La borréliose de Lyme : un risque sanitaire émergent dans les forêts franciliennes ?

Christelle Méha, Vincent Godard, Bernard Moulin, Hedi Haddad

► To cite this version:

Christelle Méha, Vincent Godard, Bernard Moulin, Hedi Haddad. La borréliose de Lyme : un risque sanitaire émergent dans les forêts franciliennes ?. Cybergeog : Revue européenne de géographie / European journal of geography, 2012, Document 601, 10.4000/cybergeog.25285 . halshs-00718570

HAL Id: halshs-00718570

<https://shs.hal.science/halshs-00718570>

Submitted on 18 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La borréliose de Lyme : un risque sanitaire émergent dans les forêts franciliennes ?

Is Lyme borreliosis an emerging health risk in the forests of Ile-de-France?

Christelle Méha, Vincent Godard, Bernard Moulin et Hedi Haddad



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/cybergegeo/25285>

DOI : 10.4000/cybergegeo.25285

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Université Paris Nanterre



Référence électronique

Christelle Méha, Vincent Godard, Bernard Moulin et Hedi Haddad, « La borréliose de Lyme : un risque sanitaire émergent dans les forêts franciliennes ? », *Cybergegeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 601, mis en ligne le 20 avril 2012, consulté le 18 février 2020. URL : <http://journals.openedition.org/cybergegeo/25285> ; DOI : 10.4000/cybergegeo.25285

Ce document a été généré automatiquement le 18 février 2020.



La revue *Cybergegeo* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 3.0 non transposée.

La borréliose de Lyme : un risque sanitaire émergent dans les forêts franciliennes ?

Is Lyme borreliosis an emerging health risk in the forests of Ile-de-France?

Christelle Méha, Vincent Godard, Bernard Moulin et Hedi Haddad

Remerciements : Cette recherche est le fruit d'une action soutenue par la Région Île-de-France dans le cadre d'un contrat Partenariats Institutions Citoyens Pour la Recherche et l'Innovation (PICRI) et d'une réponse à un appel à projet validée par le Conseil scientifique de la Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord. Nous souhaitons également remercier Bernard CAUCHETIER (IAU-Île-de-France) pour les données MOS et ECOMOS et Sylvain DUCROUX (ONF) pour les données sur la forêt de Sénart. Un grand merci également à nos étudiants (Camille DELAHAYE, Dimitri LE TORRIELEC, Marianne LIECHTY, Samuel MERMET, Juliette PINARD, Aurélien PONCE) pour leur participation à la réalisation des enquêtes de fréquentation. Les recherches et le développement de la plateforme MAGS ont été financés par Geoide, le réseau de centres d'excellence en géomatique du Canada, et par le centre de recherche de la défense Canadienne DRDC Valcartier. Le développement de la plateforme VNO-MAGS a été financé par l'institut national de santé publique du Québec (INSPQ).

Introduction

- 1 La borréliose de Lyme est une zoonose infectieuse, mais non contagieuse, due à des espèces de *Borrelia burgdorferi* sensu lato (sl), pouvant être transmise à l'Homme par des piqûres de tiques infectées par ce complexe bactérien. Avec près de 20 000 cas annuels aux Etats-Unis en 2006 (Bacon et al., 2008) et plus de 50 000 cas incidents en Europe pour le milieu des années 1990 (Perez-Eid, 2001), la borréliose de Lyme est actuellement la maladie à transmission vectorielle la plus fréquente sur l'ensemble de son aire de répartition qui s'étend du Japon à l'Amérique du Nord et de la Scandinavie à l'Afrique du Nord (Ward et Brown, 2004). Bien connue en milieu rural, de par son caractère endémique dans les régions de l'est et du centre de la France, cette maladie semble poser une nouvelle problématique de santé publique dans les espaces fortement urbanisés, et ce, en

raison d'une forte concentration humaine et de la capacité polarisante des grands massifs forestiers périurbains. Ce déploiement spatial de la problématique sanitaire aux abords des grandes villes pourrait aboutir à une recrudescence des cas constatés par des praticiens de santé. Cette crainte d'une augmentation du risque, qui n'a pas encore été démontrée, est exprimée de façon importante en région Île-de-France, et en particulier autour de la forêt domaniale de Sénart où de forts enjeux spatio-fonctionnels sont identifiés en parallèle. Peut-on dès lors parler de l'existence d'un nouveau foyer d'émergence de la maladie ? Il importe de revenir au préalable sur la notion d'émergence, de manière générale et dans un cadre épidémiologique, afin d'envisager plus loin les méthodes à même de confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Fixer le cadre de l'émergence

- 2 Le risque a été une préoccupation inhérente à l'homme tout au long de l'Histoire. Il est défini comme « *un danger, un inconvénient plus ou moins probable auquel une personne ou une collectivité est exposé* » (Veyret, 2004). Aujourd'hui, non seulement on dénombre davantage de situations de risque, mais la société moderne a renforcé la conscience des risques (Oborne in OCDE, 2003). La notion d'émergence participe de cette culture du risque et offre un cadre sémantique pour l'appréhension des risques sanitaires, qu'il s'applique à des maladies connues du passé ou à de nouvelles maladies qui accompagnent le progrès. Le phénomène connu sous le nom de « maladies émergentes » fait l'objet d'une abondante littérature, des congrès internationaux et des revues scientifiques de grande diffusion lui étant même entièrement consacrés (notamment *Emerging Infectious Diseases*, en langue anglaise).

Définition de l'émergence

- 3 La notion d'émergence est employée dans des domaines très divers (pays émergent, média émergent, forme artistique émergente, maladie émergente...). Elle imprègne toutes les sciences et peut connaître des acceptions très diverses. Prise dans son contexte épidémiologique, la notion d'émergence renvoie à des définitions aux frontières souvent floues et pas toujours consensuelles. Au point qu'il n'est pas rare, dans certaines publications, d'entendre parler d'émergence sans que ne soit discuté le sens même de ce terme. Que doit-on entendre par « maladies émergentes » ? Quand peut-on qualifier un phénomène « d'émergent » ? Ne cherche-t-on pas davantage à expliquer les facteurs à l'origine de ces émergences ? Autant d'interrogations qui nous incitent à préciser une notion, encore somme toute à l'état de discussion, et qui nourrit notamment de vives controverses dans le monde scientifique en raison du degré de complexité des phénomènes dont elle veut rendre compte. Parmi les définitions qui retiennent notre attention, celle proposée à la fin des années 1980 par les *Centers for Disease Control and Prevention*¹ des Etats-Unis fait figure de référence pour qualifier un phénomène sanitaire : « *Les maladies infectieuses émergentes sont des maladies infectieuses dont l'incidence² chez l'Homme a augmenté au cours des deux dernières décennies ou qui menace d'augmenter dans un avenir proche³* » (CDC, 1998). Cependant, d'autres auteurs ont essayé de formaliser la notion d'émergence, ne trouvant pas cette première définition assez satisfaisante pour couvrir la variété des situations épidémiologiques. Selon S. Morse (1995), les maladies infectieuses émergentes peuvent être définies comme des « *infections récemment apparues*

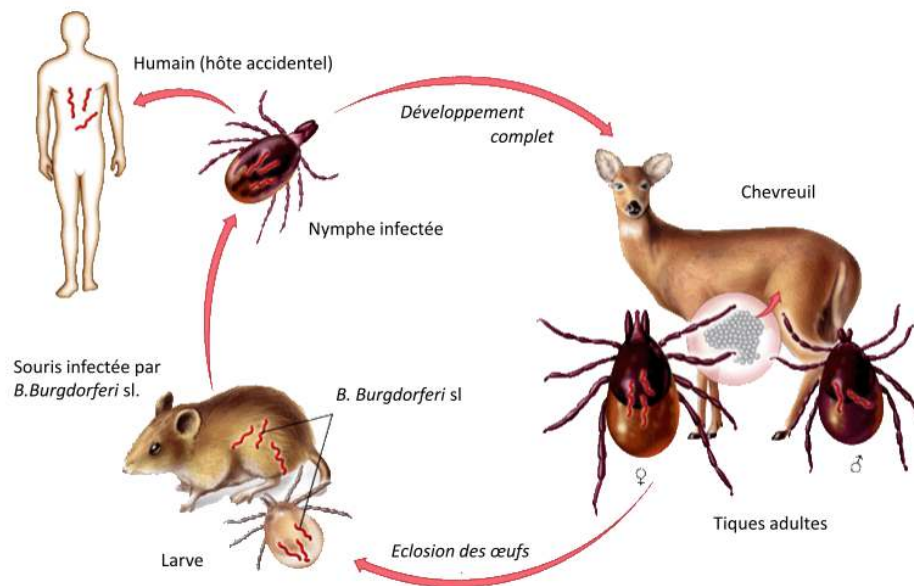
dans une population ou qui ont existé mais dont l'incidence ou la zone géographique augmente rapidement ». Dans *Les maladies émergentes, dérives des rapports de l'homme avec la nature*, M. Fassi Fehri (2001) propose la définition suivante : « il s'agit de maladies transmissibles nouvellement identifiées, d'extension rapide, susceptibles de poser des problèmes de santé publique à l'échelle locale, régionale ou internationale ». Plus récemment, les vétérinaires B. Toma et E. Thiry (2003) ont appliqué la notion d'émergence à une maladie dont « l'incidence réelle augmente de manière significative dans une population donnée, d'une région donnée et pendant une période donnée, par rapport à la situation épidémiologique habituelle de cette maladie ». Ils soulignent que « par définition une maladie n'est émergente que dans un cadre spatio-temporel donné ». Pour ces deux auteurs, les caractéristiques d'espace et de temps correspondant à cette émergence doivent être précisées systématiquement dès lors que l'on emploie l'expression « *maladie émergente* ». Nous situons là véritablement le principal apport d'une telle définition qui fait suite à de nombreuses critiques portées par ces derniers, critiques qui ont permis de préciser une notion floue parce que s'attachant à une réalité complexe. Même si, et nous l'avons constaté, ces définitions diffèrent par leur contenu, les différents auteurs s'entendent néanmoins sur une augmentation de l'incidence. Ainsi, l'indicateur essentiel de reconnaissance du caractère émergent d'une maladie serait à rechercher dans les taux d'incidence. Or, de ce point de vue, « tout phénomène épidémique peut [alors] être considéré comme une émergence », remarque F. Rodhain (2000) ; celui-ci estimant préférable d'utiliser le terme d'émergence pour qualifier l'apparition brusque d'une maladie due à un agent infectieux inconnu jusqu'alors [ou d'une souche (ou variant) particulière d'un germe connu].

Les mécanismes de l'émergence

- 4 L'apparition d'une maladie et/ou sa propagation est soumise à un ensemble de conditions favorisant l'émergence. Les facteurs susceptibles d'intervenir aux différentes étapes du processus d'émergence sont alors étroitement imbriqués et interdépendants : « les émergences sont toujours multifactorielles », souligne F. Rodhain (2003). Il rappelle aussi qu'il est nécessaire pour les comprendre de « prendre en compte le contexte biologique et climatique, mais aussi le contexte sociologique, économique et politique ». En effet, les maladies vectorielles ont une épidémiologie complexe, due notamment à la variabilité de leurs différents acteurs, *agent pathogène, vecteur, hôte vertébré*, qui ont chacun leur écologie. Le maintien et la propagation des maladies à transmission vectorielle résultent des interactions entre ces trois acteurs et des interrelations complexes qui se nouent entre ce système tripartite et son environnement. En d'autres termes, la santé des populations dépend aussi bien du milieu physique, support des hommes et de leurs activités, que de l'environnement considéré d'un point de vue plus général et incluant à la fois les éléments naturels (climat, végétation...), humains (susceptibilité, comportement...) et socio-économiques (amélioration de l'hygiène, transports, structures sanitaires...). Des évolutions écologiques, climatiques, démographiques et économiques peuvent donc favoriser le développement ou l'extension géographique de maladies vectorielles. Au vu de la spécificité de chaque système de maladie, il est difficile de traiter avec exhaustivité des facteurs d'émergence, toutefois une des principales causes invoquées dans l'émergence ou la réémergence de maladies est le risque accru d'exposition aux agents pathogènes (Blancou et al., 2005). Cette augmentation du risque d'exposition est soumise à deux principaux facteurs, à savoir l'action de l'homme et l'adaptabilité des agents infectieux (Schwartz et Rodhain, 2008). Si on prend en exemple la borréliose de Lyme,

maladie qui est considérée comme émergente dans le monde (Etats-Unis, Canada, Europe) depuis sa mise en évidence chez l'Homme à la fin des années 1970, l'extension de zones urbaines très peuplées au contact de forêts semble être la cause principale de son émergence aux Etats-Unis (Spielman et al., 1985 ; Allan et al., 2003). F. Rodhain (2003) évoque, à l'origine de l'émergence de cette maladie, « *une conjonction de facteurs liés aux variations de la faune sauvage en relation avec des bouleversements subis par les écosystèmes naturels, à l'évolution des systèmes économiques nationaux et des modes de vie des communautés humaines* ». Soulignons que le concept de maladie émergente fut introduit dans les années 1990 par S. Morse et F. Murphy aux Etats-Unis pour évoquer, spécifiquement, l'apparition de la borréliose de Lyme [et de la légionellose]. La survenue d'un phénomène d'allure épidémique – 51 cas d'arthrite inflammatoire au cours de l'année 1977 (Steere et al., 1977) – dans le comté de Lyme, Connecticut, a mis les projecteurs sur cette maladie même si celle-ci a vraisemblablement existé tant en Amérique qu'en Europe avant qu'elle ne soit différenciée et reconnue comme entité nosologique⁴. La borréliose de Lyme, qui tire son nom de cette petite ville des Etats-Unis où de nombreux cas ont été recensés vers le milieu des années 1970, est une maladie inflammatoire transmise par la piqure d'une tique infectée par une bactérie appartenant au genre *Borrelia*. Elle touche la peau, les articulations et le système nerveux, et peut devenir très invalidante, douloureuse, provoquant de l'arthrite, c'est-à-dire une inflammation des articulations. Un rapide aperçu de son système pathogène permettra au lecteur de se faire une idée plus précise du schéma de transmission de la maladie (figure 1). De façon générale, l'homme contracte la borréliose de Lyme dans les milieux forestiers où se trouvent préférentiellement les tiques. Certaines espèces de tiques affectionnent particulièrement les sous-bois frais et humides où elles peuvent se hisser sur les herbes hautes et les buissons en quête d'un hôte pour satisfaire leur repas sanguin. Non seulement la probabilité de rencontre avec une tique est conditionnée, bien évidemment, par sa présence dans le milieu mais surtout dépend-elle de nos comportements et nos habitudes de fréquentation de l'espace forestier. Car, si cette maladie touche surtout les professionnels de la forêt, elle concerne aussi tous ceux qui ont des activités de loisirs et de détente en forêt (marche à pied, jogging, cyclisme, randonnée à cheval, cueillette...). La pratique de telle ou telle activité de plein air est susceptible de faire varier notre niveau d'exposition. A notre connaissance, aucune étude ne renseigne précisément sur la nature de cette relation mais, du moins, sommes-nous en mesure d'affirmer que le fait de pratiquer une activité dans un sous-bois forestier amène potentiellement l'utilisateur à entrer en contact avec une tique infectante.

Figure 1 : Cycle de développement de la tique et acquisition de l'infection chez l'homme



Au cours de son cycle de développement, la tique se métamorphose deux fois : entre le stade larvaire et le stade nymphal, puis entre le stade nymphal et le stade adulte

(TALARO, 2005)

- 5 A une autre échelle, les facteurs sociodémographiques, culturels et économiques ont également une importance prépondérante dans la mise en évidence de contacts entre usagers et vecteurs de maladies. A cet égard, J.-C. George et C. Chastel (2002) évoquent les transformations actuelles de notre mode de vie, favorisant le temps libre et les loisirs à la campagne, pour expliquer, en partie, c'est-à-dire de façon non exclusive, l'augmentation actuelle de l'incidence de la borréliose de Lyme en Région Lorraine. Par ailleurs, S. Randolph (2003) remarque que « dans de nombreux pays de l'est de l'Europe, une plus forte exposition des hommes aux tiques infectées, résultant des changements de pratique agricole et sociologiques de l'après-communisme, peut avoir joué un rôle important dans la brutale augmentation des cas de TBE [encéphalite à tiques] au cours des années 1990 ». Ces facteurs semblent contribuer ainsi à la variété des profils des maladies émergentes et témoignent, dans le cas présent, de l'intérêt d'étudier les contacts entre forêt et société. L'analyse des dynamiques des paysages est alors essentielle pour comprendre l'émergence des phénomènes sanitaires.

Le paysage, vecteur de diffusion de maladies

- 6 En plaçant les sociétés au cœur de notre réflexion, nous inscrivons nos recherches dans le prolongement des travaux accomplis depuis une trentaine d'années par des géographes de la santé soucieux d'approfondir les liens entre santé des populations et espace. Du complexe pathogène (Sorre, 1933) aux paysages écologiques (Curtis, 2004), en passant par le système pathogène (Picheral, 1983), le paysage épidémiologique (Amat-Roze et Rémy, 1983) et la théorie des espaces partagés (Hervouët, 2003), les évolutions conceptuelles n'ont cessé de montrer que « le développement des pathologies à transmission vectorielle n'est pas un phénomène inéluctable dès lors que parasites, vecteurs et hôtes cohabitent dans un même

espace » (Hervouët et al., 2004). En effet, l'explication des disparités spatiales, sociales et temporelles observées dans les distributions de maladies nécessite de dépasser le simple cadre de l'analyse du triptyque « hôte-vecteur-pathogène ». Si le géographe français Maximilien Sorre fut le premier à poser les jalons conceptuels de l'écologie des maladies, en forgeant le concept de complexe pathogène, les limites inhérentes à ce concept, à savoir notamment l'absence de prise en compte des modifications anthropiques de l'environnement, ont abouti à un important travail de refonte conceptuelle réalisé par Henri Picheral. Au complexe pathogène, il substitue donc la notion de système pathogène (Picheral, 1983) qui permet de rendre compte des « *variations spatiales, temporelles et sociales de pathologies apparaissant comme résolument liées à l'environnement* » (Handschumacher, Laffly et Hervouët, 2003). Enfin, de portée plus limitée, le concept de paysage épidémiologique (Amat-Roze et Rémy, 1983) qui trouve ses fondements dans l'école soviétique de la « *landscape epidemiology* » (Pavlovsky, 1966) mise sur les « *discontinuités de l'environnement, ruptures ou transitions, à même de fonder des disparités dans l'expression de la maladie* » (Amat-Roze et Rémy, 1983). En d'autres termes, il repose sur un tissu de relations attachées les unes au milieu « naturel », les autres aux comportements humains, susceptible de faire l'objet d'évolutions brusques ou graduelles, à mesure que l'un ou l'autre de leurs éléments se modifie (Rémy, 1988). Or une critique majeure se situe dans le fait que ce concept ne rend compte que des espaces potentiels de la maladie. En effet, il reste « *très statique et permet peu d'intégrer les pratiques spatiales des sociétés, éminemment mouvantes*⁵ ». Pour mieux intégrer la complexité de la gestion sociale de l'environnement dans la connaissance de l'écologie des maladies, le géographe J.-P. Hervouët (2003) a conceptualisé la théorie des espaces partagés : « *ils représentent les aires fonctionnelles (ou d'expression) de la maladie, comprises comme des espaces favorables, en même temps, à tous les termes de la chaîne épidémiologique* » (Handschumacher et Hervouët, 2004). Avec cette nouvelle formulation, l'analyse de l'extension possible d'une maladie n'est plus limitée à celle de son vecteur ou hôte intermédiaire, mais à l'ensemble des espaces présentant une convergence de facteurs épidémiogènes (*Ibid.*). Les espaces sont ainsi partagés entre personnes saines et malades mais aussi entre des hommes et des vecteurs, autorisant contagion et contamination. Si l'espace exerce une influence sur la santé des individus à travers l'environnement et les différents groupes sociaux qu'il met en contact, il importe de se méfier de l'approche déterministe lorsque l'on étudie l'influence de l'environnement sur la santé. Afin de mettre en évidence les inégalités socio-spatiales de santé, certains auteurs (Duncan et al., 1993 ; Macintyre et al., 1993) ont alors suggéré de faire la distinction entre les facteurs compositionnels (caractéristiques propres à l'individu) et les facteurs contextuels (en référence à l'espace et aux lieux) ; la santé étant influencée par une grande variété de facteurs, y compris les facteurs socio-économiques (habitat, urbanisation, modes de vie, emploi, chômage...), les modèles de comportement individuel (psychologie, style de vie...) déterminés par des facteurs socioculturels (religions, croyances, traditions...) et des caractéristiques personnelles (âge, sexe, génétique, physiologie), les systèmes de santé (prévention, accès aux soins...) ainsi que les environnements physiques (exposition à des contaminants physico-chimiques ou biologiques) et sociaux (conditions de vie prises au sens large). Partant de l'analyse de ces interactions, S. Curtis (2004) recense plusieurs paysages conceptuels dont le « *paysage écologique* » (*ecological landscape*). Ce concept d'ampleur plus vaste, que ceux présentés précédemment, privilégie alors l'étude des processus sociaux combinés avec les caractéristiques de l'environnement physique qui produisent des inégalités dans l'exposition aux risques environnementaux (Curtis, 2004). Ces paysages écologiques sont

alors susceptibles d'entraîner des situations d'émergence, une situation que nous interrogeons dans le cas de la borréliose de Lyme, étant donné le vaste débat qu'elle suscite dans le monde scientifique international.

L'émergence en question : le cas de la borréliose de Lyme

- 7 Si la borréliose de Lyme est reconnue par les instances scientifiques internationales [Organisation Mondiale de la Santé (OMS), Food and Agriculture Organization (FAO), Organisation mondiale de la santé animale (OIE)] comme étant une maladie émergente, certains spécialistes semblent cependant plus nuancés sur la question et mettent en évidence des spécificités dans l'expression de la maladie en fonction des différents contextes géographiques.

Pour une régionalisation de l'émergence

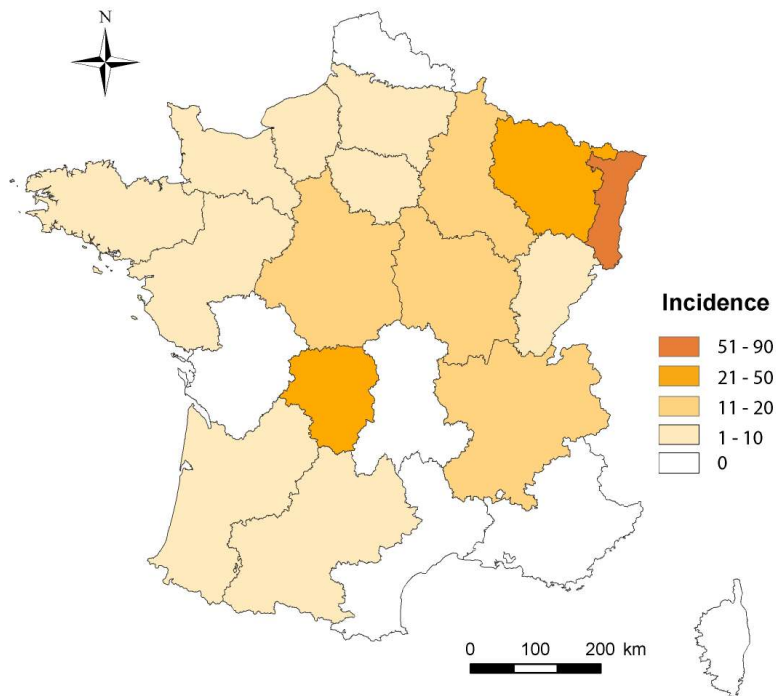
- 8 Les maladies infectieuses émergentes résultent d'infections nouvellement identifiées et auparavant inconnues qui entraînent des problèmes de santé publique au niveau local, régional et international. Il convient d'insister sur ces différents niveaux d'échelles. La borréliose de Lyme est considérée comme faisant partie des maladies émergentes, car non évoquée par la littérature ancienne, et car, le nombre des tiques, de tiques infectées, et/ou le nombre de patients infectés a, depuis quelques décennies, rapidement augmenté sur l'ensemble de son aire de répartition mondiale. Or, de façon objective, il semble difficile de vouloir généraliser l'émergence tant il existe une variété de contextes géographiques. Un certain nombre de spécialistes discutent du caractère émergent de cette affection, en partie pour ces raisons. Selon F. Rodhain (2003), « *l'émergence (...) de la borréliose de Lyme est régionale, limitée au continent nord-américain* » (environ 3 millions de cas des années 1970 aux années 2000). Toujours, selon ce dernier, « *en Europe, l'apparente augmentation, d'ailleurs modérée, de l'incidence depuis une vingtaine d'années ne traduirait vraisemblablement que l'amélioration du dépistage de la maladie* » (Rodhain, 2003). B. Toma et E. Thiry (2003) rejoignent ce même constat : « *dans quelle mesure l'identification de son agent pathogène (...), associée à l'amélioration des méthodes de son diagnostic et à la mise en place de système d'épidémiologie spécifique, ne suffit pas à expliquer l'augmentation apparente de l'incidence de cette maladie dans certaines parties du monde ?* ». Un autre point est soulevé par Muriel Cornet, directrice (entre 2006 et 2010) du Centre National de Référence (CNR) des *Borrelia*, dans une interview pour le magazine *Porphyre*⁶ : la borréliose de Lyme est « *une maladie émergente en termes de connaissances puisqu'elle est de découverte récente* » mais « *en revanche, on ne peut pas dire aujourd'hui que le nombre de cas augmente de manière significative* ». Nous touchons là un autre problème. L'adjectif « *significatif* » vient qualifier une augmentation inhabituelle de l'incidence de la maladie, c'est-à-dire supérieure à ses fluctuations habituelles. Or les études épidémiologiques humaines sur cette affection restent encore très fragmentaires et ne permettent pas une connaissance précise de son incidence. Observons néanmoins que des efforts sont actuellement poursuivis en ce sens (nous y reviendrons). Même si les données ne permettent pas toujours de rendre compte de son émergence, la borréliose de Lyme semble toutefois poser une nouvelle problématique de santé publique dans des contextes socioculturels bien déterminés et/ou des espaces géographiques bien délimités. Au Canada, par exemple, la surveillance des

populations de tiques a permis de « *déceler de nouvelles zones endémiques, même si des méthodes complémentaires sont requises pour déterminer les zones émergentes de la maladie* » (Agence de la Santé Publique du Canada, 2009⁷). Par ailleurs, dans les pays baltes ou scandinaves, la borréliose de Lyme semble aussi émerger (Lindgren et al., 2000 ; Randolph, 2001). Si la maladie fait son apparition dans certaines régions du monde, il est difficile de parler d'émergence tant celle-ci est sujette à controverses et doit reposer sur des mesures objectives de l'incidence doublées d'un effort en terme de réactivité.

Spécificité du contexte français

- 9 La borréliose de Lyme revêt un caractère endémique dans les régions de l'est et du centre de la France, autrement dit la maladie y est établie et pratiquement présente en tout temps dans la collectivité. En témoignent les enquêtes régionales d'incidence (Alsace, Lorraine, Limousin, Auvergne, Haute- et Basse-Normandie) effectuées depuis 2002 par le CNR des *Borrelia* et les Cellules Inter-Régionales d'Épidémiologie et d'intervention (CIRE). En Alsace, l'incidence est estimée à 180 cas pour 100 000 habitants, avec une incidence locale pouvant atteindre par endroits plus de 250 cas pour 100 000 habitants (exemple de certains cantons d'Alsace ; InVS, 2005). Ces enquêtes, qui ont montré des variations régionales importantes (Postic et Ferquel, 2005, 2006 ; Postic et Baranton, 2006 ; Ferquel et al., 2006), visent à une meilleure connaissance du niveau de risque dans chaque région française. La mise en place de ce réseau de surveillance prolonge une mesure d'orientation prise en juillet 2000 par l'Institut de Veille Sanitaire (InVS). En effet, cet organisme a entrepris « un travail de hiérarchisation dans le domaine des zoonoses non alimentaires dans l'objectif de déterminer les priorités et les moyens à mettre en oeuvre afin d'améliorer la connaissance, la prévention et le contrôle de ces maladies ». Parmi les 37 maladies analysées et au vu des critères retenus pour la hiérarchisation de ces maladies, la borréliose de Lyme a été retenue dans la liste des maladies prioritaires pour la programmation des actions de l'InVS en raison de son « caractère émergent et de sa gravité potentielle » (Valenciano, 2002). Une démarche d'autant plus nécessaire que l'incidence est mal connue à l'échelle nationale ; la maladie ne figure pas parmi la liste des 29 affections à déclaration obligatoire dans notre pays même si elle est reconnue depuis 1988 comme une maladie professionnelle chez les personnes particulièrement exposées (bûcherons, gardes forestiers...). Dans le même temps, la difficulté à recueillir des informations cliniques exhaustives explique le peu de données disponibles en France permettant d'estimer l'incidence de la maladie. Les rares estimations situent aux alentours de 5 500 le nombre de nouveaux cas par an de borréliose : l'incidence moyenne étant évaluée à 9,4 cas pour 100 000 habitants (intervalle de confiance à 95 % allant de 7,4 à 11,4) selon une étude épidémiologique menée de façon prospective, entre mai 1999 et avril 2000, à partir d'un réseau de médecins Sentinelles répartis sur tout le territoire national (Letrillart et al., 2005 ; carte 1).

Carte 1 : Carte de l'incidence de la borréliose de Lyme en France pour 100 000 habitants (enquête 1999-2000)



SOURCE : D'APRÈS LETRILLART ET AL., 2005

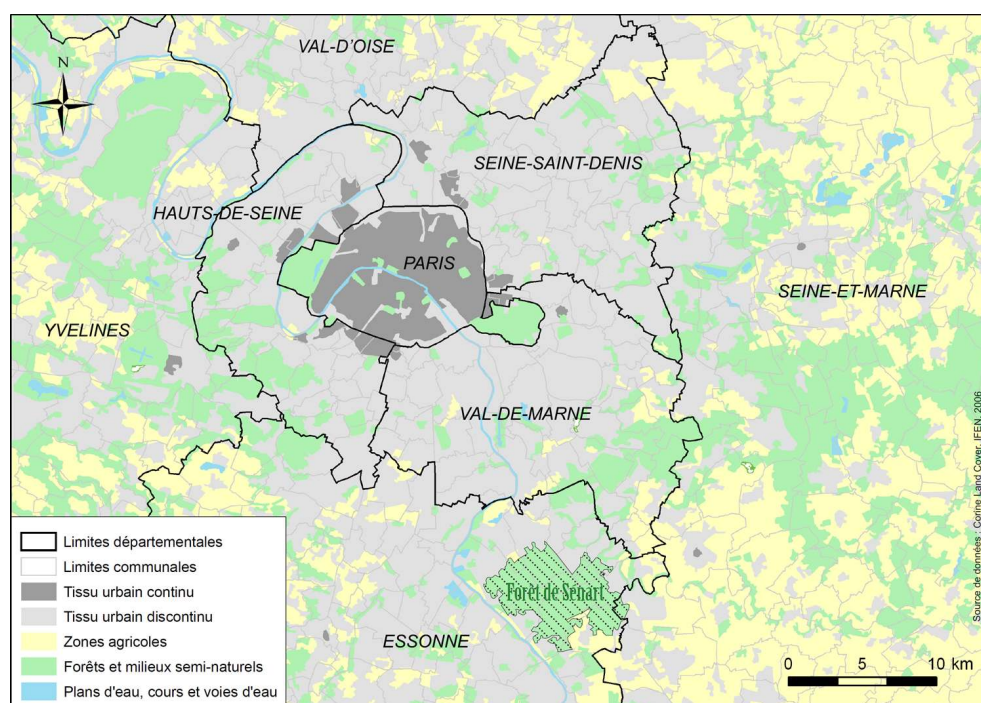
- 10 Or, d'après N. Guy (2007), cette évaluation serait sous-estimée par un biais méthodologique révélé par l'absence de cas signalés dans certaines régions que l'on sait très concernées par la maladie, à l'exemple de l'Auvergne. En effet, les études récentes menées dans cette région en 2004 ont permis de mettre en évidence une incidence estimée respectivement à 37 et 58 cas pour 100 000 habitants dans les départements de l'Allier et du Cantal, (Postic et Ferquel, 2005). Si ces données se rapportent à des régions encore majoritairement rurales, la maladie a tendance, depuis quelques années, à s'urbaniser en se rapprochant des grandes agglomérations urbaines (Amat-Roze, 2004). Le cas semble se poser en Île-de-France même si, à l'heure actuelle, le diagnostic nécessite tout d'abord d'objectiver ce constat. Le risque de borréliose de Lyme a été peu évalué en Île-de-France et une actualisation des données sur le niveau de risque dans cette région représente ainsi une priorité dans le cadre d'une politique de prévention efficace de la maladie.

Autour de la forêt de Sénart : un nouveau foyer à borréliose en Île-de-France ?

- 11 L'anticipation du risque repose sur la nécessité de prendre en considération les expositions et les facteurs de risque. L'amélioration de nos connaissances en la matière nécessite alors de définir une proposition méthodologique pour valider l'hypothèse d'un nouveau foyer émergent en Île-de-France. Dans un contexte périurbain très marqué, qui traduit l'évolution du rapport spatio-fonctionnel entre ville et forêt, le site très fréquenté

de la forêt de Sénart (Essonne) – dont le nombre de visites annuelles est estimé à plus de trois millions (Maresca, 2000) – est particulièrement adapté à ce volet d'étude. En point d'orgue, la survenue récente de plusieurs cas de borréliose de Lyme dans le sud-est francilien, occasion pour nous d'attirer l'attention sur le niveau de risque de contracter la maladie en région Île-de-France. Les informations recueillies dans le service des maladies infectieuses et tropicales du Centre Hospitalier Intercommunal de Villeneuve-Saint-Georges (CHIV), au cours de l'année 2006, indiquent, en effet, que de nombreux médecins généralistes exerçant en périphérie de la forêt de Sénart (carte 2) ont constaté, sans toutefois l'avoir objectivée, une recrudescence du nombre de piqûres de tiques et de cas de borréliose de Lyme.

Carte 2 : Carte de localisation de la forêt de Sénart



- 12 De plus, ce site présente un autre intérêt dans la mesure où il héberge une importante communauté de tamias de Sibérie (*Tamias sibiricus*) – espèce exotique naturalisée en France – dont le rôle dans la circulation de l'agent pathogène *B. burgdorferi* si serait à l'origine de l'émergence potentielle de la borréliose de Lyme en Île-de-France, et notamment aux abords de la forêt de Sénart (Chapuis, 2005). Si cette présomption n'est pas pour l'instant confirmée, il apparaît, cependant, que cet écureuil, dont la population compte entre 10 000 et 20 000 individus de cette espèce en forêt de Sénart, est à la fois plus infesté par les tiques et plus infecté par *B. Burgdorferi* que les rongeurs autochtones (Chapuis et al., 2010). Rappelons qu'aux Etats-Unis l'émergence de la borréliose de Lyme est aussi à mettre en relation avec la prolifération de la souris à pattes blanches⁸ (*Peromyscus leucopus*) dont les populations ont fortement augmenté ces dernières décennies du fait de la fragmentation des paysages forestiers (Allan et al., 2003). Sachant qu'une des conséquences de l'hétérogénéité spatiale est la réduction de la diversité spécifique dans les îlots forestiers, la souris à pattes blanches a pullulé dans ces milieux fragmentés probablement à cause de cette diminution de l'abondance de prédateurs (Nupp et Swihart, 1998). Une série de raisons qui justifient que cette forêt, située à

environ 20 km au sud-est de Paris et d'une superficie de 3 200 hectares, soit alors considérée comme pilote dans le cadre d'un programme de recherche PICRI⁹ financé par la région Île-de-France. Après avoir justifié le choix de ce site, nous souhaitons désormais aborder les différents points qui ont retenu notre attention. Le premier point (a) se rapporte à l'estimation de l'incidence de la maladie. A cet égard, une enquête prospective, susceptible de nous renseigner sur une éventuelle augmentation du nombre de cas de borréliose de Lyme et de nous documenter sur les lieux fréquentés par les personnes atteintes, est actuellement en cours de réalisation. Reprenant la méthodologie des précédentes enquêtes effectuées par les CIRE et le CNR des *Borrelia*, elle comporte le signalement des nouveaux cas de malades résidant autour de la forêt de Sénart par un réseau de médecins exerçant dans une zone définie à proximité de ce massif forestier. Le périmètre concerné comprend 50 communes pour une population totale de 650 000 habitants. Six de ces communes sont dans le département de la Seine-et-Marne, 29 dans l'Essonne et 26 en Val-de-Marne. Cette enquête se prolongera sur plusieurs années afin d'analyser la saisonnalité de la maladie et son évolution dans le temps. Remarquons qu'à cette date l'état d'avancement de nos travaux ne nous permet pas de connaître le chiffre de l'incidence aux abords de la forêt de Sénart. Le deuxième point (b) concerne la détermination des espaces et environnements à risque en lien avec la distribution géographique du vecteur et son taux d'infection. L'objectif est de localiser et caractériser les milieux forestiers favorables à l'écologie de l'espèce *Ixodes ricinus* (vecteur principal de la borréliose de Lyme en Europe de l'ouest ; Anderson *et al.*, 1986) et d'établir une typologie afin de faciliter la surveillance des zones potentiellement à risque¹⁰. En s'appuyant sur les typologies issues du catalogue des stations forestières utilisé par l'ONF, la forêt de Sénart va de « l'aulnaie-frênaie » à la « lande à callune » en passant par différents faciès de « chênaie-charmaie ». Y a-t-il, parmi ces stations forestières, des groupements végétaux plus favorables que d'autres au développement ou au maintien du cycle de la maladie, que ce soit directement celui des populations de tiques ou de leurs hôtes habituels (micromammifères, cervidés...) ? A ces données caractérisant le couvert végétal seront également confrontées les données obtenues sur la distribution du vecteur et celles sur la fréquentation de la forêt de Sénart (*cf. infra*). En parallèle des collectes de tiques sur la végétation (*in-situ*), une deuxième méthode va être testée pour accroître l'extension spatiale de l'information sur la distribution des populations de tiques. Elle consiste à utiliser la charge en tiques des chevreuils prélevés lors des chasses (Vor *et al.*, 2009). La combinaison de ces deux sources d'informations relatives à la présence des tiques dans le milieu devrait permettre une cartographie de la distribution des tiques en forêt de Sénart. Selon des premières informations, la densité des nymphes en forêt de Sénart est estimée à 64 individus pour 100 m² avec un taux d'infection de 10 % (certes équivalent à celui de la moyenne nationale) alors susceptible d'engendrer un risque pour les nombreux visiteurs de ce site (Cornet et Ferquel, 2008). Enfin, le troisième aspect (c) porte sur la nécessité de tenir compte des enjeux humains, étape inhérente à toute démarche sur le risque et point à même de démontrer tout le savoir-faire et la spécificité du géographe. Ce point sur lequel nous reviendrons plus longuement dans la partie suivante concerne la territorialisation des vulnérabilités. Il s'appuie sur un protocole d'investigation qui a été pensé pour être reproductible sur d'autres forêts afin de dresser, dans une future étape, une « cartographie » de l'exposition à la borréliose de Lyme sur un ensemble de forêts périurbaines, au moins franciliennes. Ce protocole est constitué de trois enquêtes dont une cible particulièrement la fréquentation du massif de Sénart. Effectuée durant les périodes de plus forte activité des tiques, mais aussi sur des périodes

ciblées, lorsque des « attracteurs » sont présents dans le sous-bois (principalement, jonquilles, muguet, champignons), cette enquête concerne toutes les catégories de promeneurs et également certains groupes d'usagers (associations de randonneurs, de mycologues et de pratiquants de courses d'orientation) afin d'évaluer les pratiques de groupes encadrés. Par ailleurs, un deuxième type d'enquête prend en considération l'aspect pénétrabilité des sous-bois à partir des chemins pour évaluer la plus ou moins grande perméabilité du système fossé-lisière en direction du sous-bois. Cette mesure de la résistance à la pénétration du milieu s'appuie également sur les données d'infrastructure des gestionnaires (ici l'Office national des forêts, ONF), comme les grillages, les travaux sur fossés... Enfin, un troisième questionnaire d'enquête, en association avec le CNR des *Borrelia* de l'Institut Pasteur, apporte l'information relative aux densités de tiques et au pourcentage de tiques infectées par le complexe bactérien. Deux types de collectes de tiques sont pratiqués pour qualifier les milieux forestiers : l'une tous les mois, de mars à novembre, sur huit stations, pour couvrir toute la période d'activité des tiques ; l'autre se focalisant sur les principaux pics d'activité des tiques, à savoir les mois de mai-juin (pic principal) et septembre-octobre (pic secondaire) pour les pays d'Europe tempérée (Gray, 1991), à raison de 50 à 100 placettes d'enquête, selon la disponibilité des enquêteurs.

La construction d'un territoire du risque

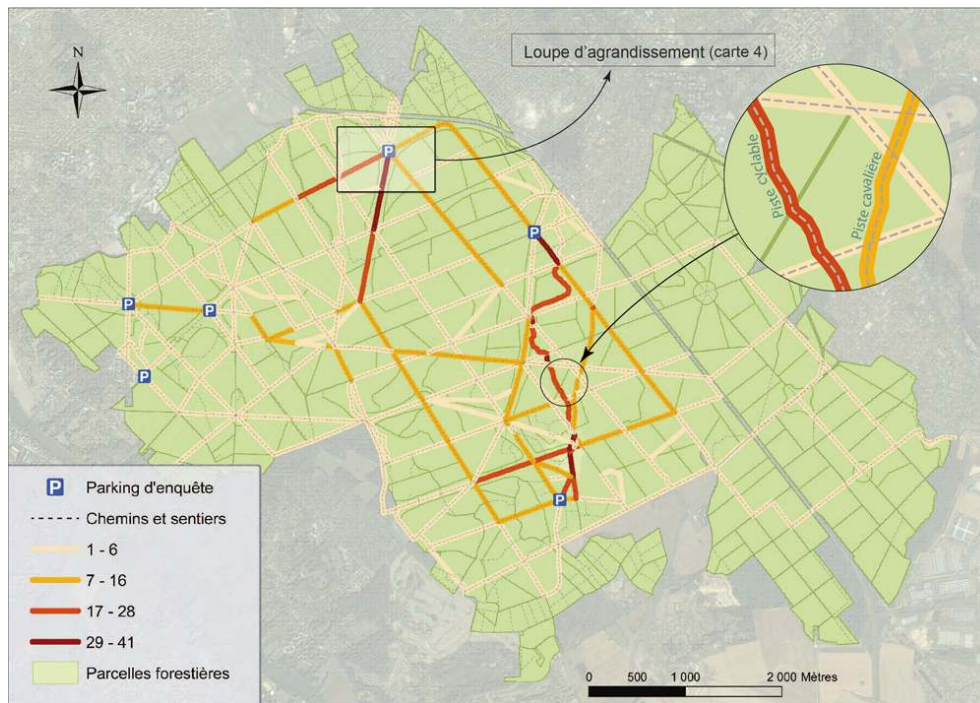
- 13 L'évaluation des risques consiste « à définir et à évaluer chaque étape d'une trajectoire depuis les causes d'un danger jusqu'aux conséquences pour un système donné » (OCDE, 2003). En ce sens, elle constitue un élément déterminant de la décision concernant la manière dont les risques peuvent être évités ou atténués. D'un point de vue épidémiologique, le risque de contracter la borréliose de Lyme est lié à la probabilité d'être piqué par une tique infectante. Cette probabilité dépend notamment de l'abondance et du taux d'infection du vecteur ainsi que des différents types de comportements humains (pénétration et fréquence de visites des foyers d'infection, vitesse et efficacité du « détiqage »). La composante *vulnérabilité*, relative à l'ensemble des facteurs déterminant l'exposition humaine à la source pathogène, est ici privilégiée par rapport à la composante *aléa* du risque qui fait l'objet, par ailleurs, d'une abondante littérature sur laquelle nous ne reviendrons pas. Enfin, nous présenterons le cadre théorique et méthodologique approprié à l'étude des comportements et des pratiques socio-spatiales favorisant le contact entre les populations humaines et les populations de tiques.

Territorialisation des vulnérabilités

- 14 Trop souvent négligé dans les études sur le vecteur, le paramètre humain constitue une composante essentielle du risque. En ce sens, il importe de poser la question des enjeux humains, qui revient à s'intéresser plus particulièrement au contact entre forêt et société. Dès lors, l'analyse doit notamment apporter les éléments nécessaires à l'identification des comportements associés à un risque accru d'exposition à l'aléa. Une étude, s'étalant de 2009 à 2012, qui consiste à évaluer les connaissances, les attitudes et les pratiques des personnes fréquentant la forêt de Sénart vis-à-vis de la borréliose de Lyme et des populations de tiques est actuellement en cours de réalisation par auto-questionnaire via les associations ayant des activités en forêt (associations de randonnée) et par questionnaire en face à face auprès des usagers eux-mêmes. Ces enquêtes de

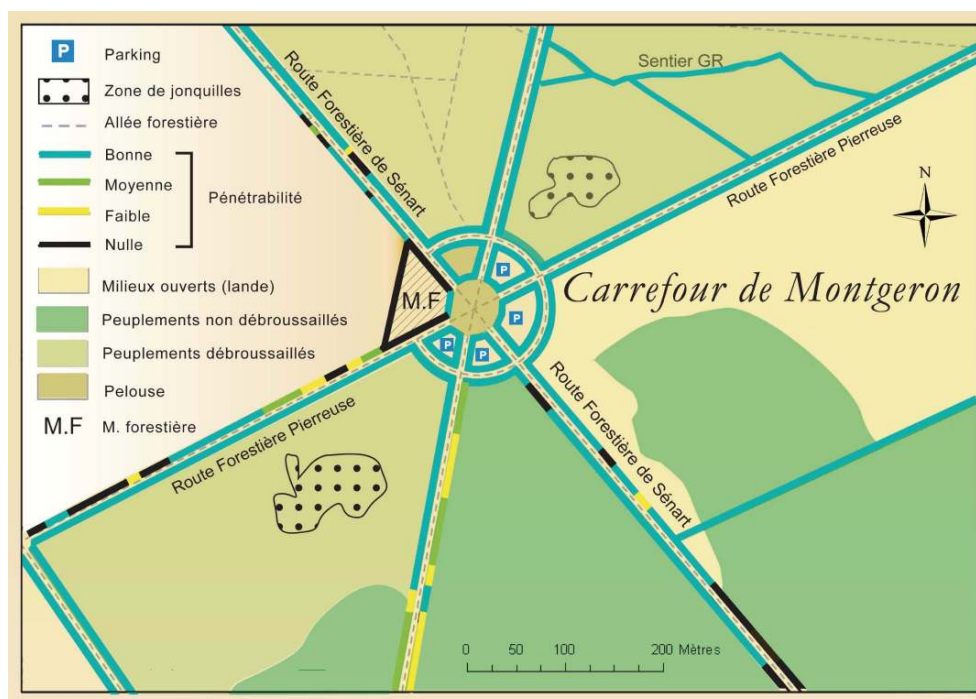
fréquentation sont réalisées à différentes périodes de l'année, favorables aux populations de tiques et aux activités ludiques ou de collecte en forêt (cueillette de muguet, jonquilles, champignons...). A l'issue de leur séjour en forêt, les usagers sont questionnés pour relever graphiquement leur trajet à des fins d'analyse spatiale. Après une vectorisation de tous les trajets sous le logiciel ArcGIS® et la réalisation d'un traitement topologique (afin d'avoir des trajets bien superposables), une addition du nombre de promeneurs ayant emprunté chaque tronçon donne le résultat suivant (carte 3).

Carte 3 : Carte de l'intensité de la fréquentation par tronçons



- 15 Il s'agit ici d'un exemple de cumuls de 187 trajectoires-échantillon, au départ de 6 parkings, obtenues grâce aux enquêtes réalisées en 2009. La montée en valeur du rose saumon vers le marron permet de comparer les zones de faible ou de forte fréquentation et de constater que, sur cet échantillon, très peu de visiteurs ont quitté les sentiers. Afin de rendre la carte plus lisible et éviter que le lecteur ait l'impression qu'une proportion significative de visiteurs sort des sentiers, nous avons ajouté en médaillon une loupe d'agrandissement sur un secteur très fréquenté de la forêt. D'un point de vue géographique, il est alors intéressant de mettre en évidence des contacts entre les itinéraires de promenade des usagers en forêt et des secteurs identifiés comme étant « à risque ». Cette mise en évidence de contacts entre les « parcours forestiers » des usagers de la forêt et des secteurs « à risque » est susceptible de dévoiler les problèmes d'aménagements destinés à l'accueil du public. Car la forêt de Sénart fait l'objet depuis plusieurs décennies d'un aménagement interne et périphérique prenant en compte l'accessibilité et la fréquentation (Moigneu, 2005). A cet égard, le traitement des lisières internes et externes par le gestionnaire forestier peut favoriser le contact homme-tique ou, au contraire, l'atténuer. Plus la lisière est claire, plus son franchissement en sera aisé pour le promeneur, et inversement, une lisière très dense rendra l'accessibilité du sous-bois impossible ou, du moins, plus délicate (carte 4).

Carte 4 : Carte de l'accessibilité du sous-bois (à hauteur du carrefour de Montgeron)



- 16 La lisière doit être ainsi considérée comme une membrane, plus ou moins poreuse, qui pourrait être franchie selon la présence d'attracteurs en sous-bois (zones de jonquilles, plages de muguet, coins à champignons...). Afin de mesurer l'exposition à l'aléa, nous avons observé la distribution spatiale à grande échelle des tiques à partir de transects répartis sur l'ensemble du massif forestier de Sénart. Dans l'exemple proposé dans les figures 2 et 3, la collecte des tiques a été réalisée le long de deux transects (A-A' et B-B') d'orientation NW-SE (50 mètres de long) et WSW-ENE (10 mètres de long) positionnés dans la parcelle n° 10 (carte 5). Les collectes de tiques ont été réalisées selon la méthode classique dite du « drapeau » ou de la drague ; technique qui consiste à traîner lentement sur la végétation ou la litière un tissu (1 x 1 m) en coton de couleur blanche, faisant office de leurre (Aeschlimann, 1972).

Carte 5 : Localisation des transects A-A' et B-B' dans la parcelle n° 10

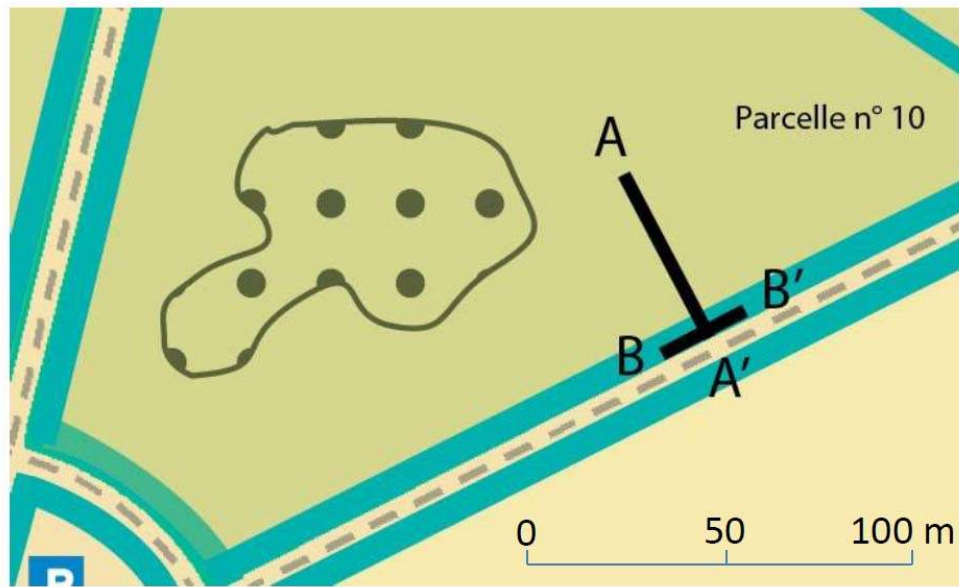


Figure 2 : Méthode d'échantillonnage des tiques (par transect)

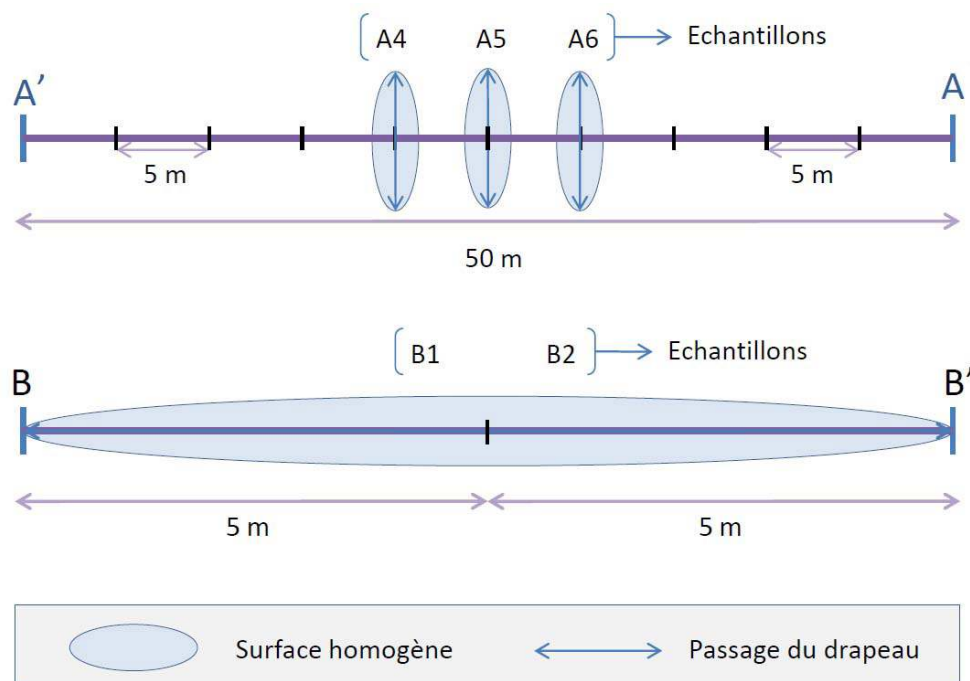
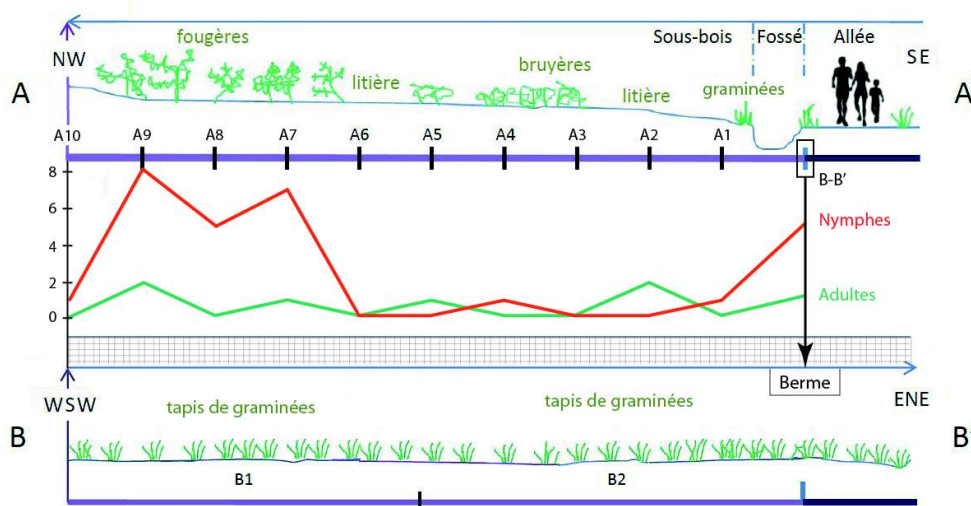


Figure 3 : Profil de végétation à partir des transects A-A' et B-B' et nombre de tiques (nymphes et adultes) collectées sur le transect A-A' (à partir des données du tableau 1)



- 17 Des surfaces homogènes ont été définies en fonction de la présence ou de l'absence de couverture végétale herbacée ou arbustive. La nature et la composition floristique des groupements végétaux du sous-bois ont été examinées pour permettre une meilleure représentativité de nos échantillons. Des points d'échantillonnage (A1, A2, A3, ..., A10) ont été répartis tous les 5 mètres le long du transect A-A' sur une bande de 1 m x 5 m de large ; ce qui représente au total, pour ce transect, 50 m² de surface échantillonnée. Concernant le transect B-B', les collectes de tiques ont été réalisées sur une distance de 2 x 5 m (échantillons B1 et B2) et sur une bande d'un mètre de large ; soit 10 m² de surface échantillonnée au total. Le nombre total de tiques collectées à chaque relève de drapeau est mentionné dans le tableau 1.

Tableau 1 : Nombre de tiques (nymphes et adultes) collectées par points d'enquêtes

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	B1	B2	Total
Nymphes	1	0	0	1	0	0	7	5	8	1	7	4	34
Adultes	0	2	0	0	1	0	1	0	2	0	0	2	8

Légende des couleurs :

	Bermes enherbées (<i>Graminées</i>)
	Fougère aigle (<i>Pteridium aquilinum</i>)
	Bruyère commune (<i>Calluna vulgaris</i>)
	Litière végétale

- 18 L'exemple, présenté ici, correspond à des prélèvements de tiques dans le milieu, réalisés sur une même journée, le 14 juin 2009, pour assurer la comparabilité entre les résultats obtenus. Soulignons, tout d'abord, l'importance numérique des nymphes par rapport aux adultes ; paramètre qui, associé à leur petite taille (qui les fait passer plus inaperçues et rester fixées plus longtemps sur un hôte), les rend responsables d'un plus grand nombre de piqûres (et d'infections). En première analyse, nous pouvons en déduire que certaines associations végétales telles que les nappes homogènes de Fougère aigle (*Pteridium*

aquilinum) en sous-bois ou les bernes enherbées (à Canche flexueuse – *Deschampsia flexuosa* – principalement) semblent plus à même de constituer des habitats à tiques dans la parcelle n° 10 et ses marges. La probabilité de rencontre avec une tique (infectante ou non) serait donc plus élevée au franchissement des bernes ainsi qu'au passage dans les zones denses de fougères. Toutefois, l'exemple proposé dans cet article ne couvre pas la totalité des associations végétales basses rencontrées en forêt domaniale de Sénart et ne saurait donc se réduire à ces seuls groupements végétaux identifiés comme potentiellement « à risque ». De même, une comparaison plus systématique est évidemment nécessaire pour rendre compte des habitats favorables aux populations de tiques. Nous n'en faisons pas l'économie, même si nous ne présentons pas ici les résultats issus de ces investigations (ceux-ci feront l'objet d'un prochain article), préférant nous arrêter sur la structuration des données collectées en vue de proposer un modèle de simulation des comportements de mobilité dans l'environnement forestier. Notre choix s'est porté sur une modélisation par système multi-agent par opposition à d'autres formes de modélisation (par équations différentielles par exemple). Non seulement ce type de modélisation permet de se représenter un environnement hétérogène et dynamique, mais surtout de faire cohabiter dans ce même environnement des agents avec des comportements différents, alors que les modèles classiques expriment quant à eux des dynamiques à partir de variables agrégées (soit à niveau global). Quelques exemples pris dans la littérature permettent de mesurer leur plus-value. Toutefois, les contextes et les protocoles sont parfois un peu éloignés pour espérer s'en inspirer. C'est le cas notamment de l'approche développée par D. García López (2010) dans sa thèse qui, même si elle présente un intérêt certain en termes de modélisation d'un système complexe, ne peut être transposée à notre étude, car elle se focalise sur l'influence de la mobilité humaine sur la propagation de la dengue. Contrairement à cette maladie, la borréliose de Lyme ne fait pas intervenir l'Homme dans le cycle de vie de la bactérie – à la différence des micromammifères et des oiseaux qui, eux, sont capables (pour certains) d'assurer l'entretien de l'infection. Si le contexte épidémiologique diffère, l'environnement de la simulation n'en est que plus éloigné, puisqu'il s'agit ici d'une recherche à petite échelle, régionale, qui s'appuie sur un réseau de villes. De même, les travaux menés par M. Artzrouni et J.-P. Gouteux (2001) sur la modélisation de la dynamique de l'infection à *trypanosoma* en Gambie ne s'avèrent guère plus opérants pour notre cas. Comme précédemment, cela tient au fait que le cycle épidémiologique de la trypanosomiose africaine fait intervenir le réservoir humain dans la transmission du parasite. En revanche, les simulations proposées par V. Laperrière et al. (2009) pour analyser les processus d'expression spatiale de la peste bubonique à Madagascar constituent une piste intéressante que nous ne saurions négliger. Bien que la simulation décrite repose sur un nombre restreint de postes d'occupation et d'utilisation du sol, contrairement à ceux que nous avons obtenus en forêt et reposant sur la combinaison d'une vingtaine de variables (dont nous ne faisons pas mention dans cet article), le cycle épidémiologique de la maladie présente des similitudes avec celui de la borréliose de Lyme. Ainsi, il y a certainement des enseignements à tirer de ce type d'approche et c'est principalement pour ces raisons que nous souhaitons intégrer nos données dans un environnement de simulation dont le formalisme repose sur la théorie de la complexité.

Intégration des données dans un environnement de géosimulation multi-agents

- 19 « *Le champ de la modélisation en sciences sociales, particulièrement en géographie, en aménagement de l'espace et en urbanisme, a connu une émergence importante à partir du milieu des années 1990* » rapportent J.-P. Antoni et P. Frankhauser (2008) qui affirment, dans le même temps, qu'il s'est aujourd'hui « *constitué un background scientifique remarquable, au sein duquel figurent de nombreuses bases de connaissances désormais validées* ». Alors confrontés à la complexité des comportements de mobilité, et souhaitant rattacher nos travaux à ce cadre théorique et méthodologique, nous avons envisagé un couplage avec des modèles de simulation informatique. S'appuyant généralement sur la théorie de la complexité (Morin, 1990), les modèles de simulation informatique permettent aujourd'hui une approche renouvelée pour la prise en compte des systèmes et des processus complexes en sciences sociales (Gilbert et Troitzsch, 2005). Si nous revenons sur le processus de simulation dans le cadre de modèles à base d'agents, il est important d'insister sur quelques concepts clefs du paradigme multi-agents afin d'éclairer le lecteur sur l'environnement de la simulation. Tout d'abord, un système multi-agents est un système composé d'un ensemble d'entités autonomes, les agents, qui sont en interaction dans un environnement pour résoudre des problèmes. Entendu dans ce contexte, un « agent » est alors défini comme une entité physique ou virtuelle qui détient tout ou partie des caractéristiques suivantes : être capable d'agir dans un environnement, de communiquer directement avec d'autres agents, posséder des ressources propres, être capable de percevoir de manière limitée son environnement, etc., en tenant compte des ressources et des compétences dont il dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'il reçoit (Ferber, 1995). D'après la définition proposée *supra*, deux types d'interaction sont à distinguer dans un système multi-agents telles les interactions de l'agent avec les autres agents et les interactions de l'agent avec son environnement spatial. Si un agent ne peut exister sans environnement (Badeig, 2010), l'environnement ne peut néanmoins se réduire à une simple infrastructure à partir du moment où ce dernier dispose d'une dynamique propre. De ce point de vue, l'environnement devient une composante à part entière du système multi-agents et nécessite d'être pris en compte dans la phase de modélisation. Après avoir posé ces quelques jalons, il reste à définir l'approche de géosimulation qui sera privilégiée dans notre démarche. Récemment apparue dans les domaines de l'informatique et des sciences de l'information géographique, cette approche est à distinguer d'autres techniques de simulation par l'attention particulière qui est portée à l'espace géographique (mis en évidence par le préfixe *géo-*). En effet, la géosimulation (Benenson et Torrens, 2004) utilise fondamentalement les données géographiques comme environnement de simulation pour que les agents ou les mécanismes de simulation puissent interagir directement et prendre des décisions en fonction de l'environnement géographique ; soulignons que les phénomènes émergents surviennent toujours en fonction de l'environnement géographique dans lequel la simulation évolue (Perron, 2004). A la faveur de ce constat, nous avons alors défini les objectifs de la géosimulation multi-agents au regard de notre problématique afin d'exploiter le potentiel qu'offre ce type d'approche. Ces objectifs visent (1) à reproduire dans un environnement virtuel géoréférencé (celui de la forêt de Sénart) les comportements d'un échantillon de promeneurs au contact des ressources du « milieu naturel », (2) à analyser les itinéraires

de déplacement des individus dans un environnement considéré comme « à risque » en tenant compte de la dynamique des populations de tiques (appréhendé via l'analyse des types forestiers et des stations), et enfin (3) à offrir des outils aux décideurs pour la simulation de divers scénarios d'intervention et l'analyse de leur impact sur les risques encourus par les visiteurs du site. Sur le plan de la méthode, nous utiliserons la plateforme MAGS (acronyme de *Multi-Agent GeoSimulation*), une plateforme de géosimulation multi-agents développée par le laboratoire d'informatique cognitive de l'Université Laval (Moulin et al., 2003). Cette plateforme est un environnement de développement permettant la création d'espaces géographiques virtuels (en 2D et 3D) dans lesquels des milliers d'agents peuvent naviguer selon des besoins différents. Dans cette plateforme logicielle générique, les agents se déplacent dans leur environnement virtuel de façon autonome en se basant sur leurs systèmes de perception. On distingue alors deux modes de navigation : le mode *following-a-path* (suivre un chemin particulier) et le mode *obstacle-avoidance* (éviter les collisions avec les obstacles et les autres agents). Dès lors, la géosimulation nécessite la génération de plusieurs cartes dont nous relevons ici les principales caractéristiques :

- Le comportement de navigation des agents visiteurs nécessite la génération d'une carte « d'obstacles » qui permet de représenter les espaces navigables (allées, sentiers, etc.) et non navigables (sous-bois dense et impénétrable...).
- Le comportement « social » des agents visiteurs nécessite la génération d'une carte « d'attracteurs » pour toutes les activités. Le concept d'attracteur représente les espaces (objets ponctuels, surfaciques ou linéaires) de la forêt qui sont « favorables » à l'exécution de certaines activités. Observons qu'il existe des activités saisonnières (cueillette, chasse...) et non saisonnières (marche, cyclisme...), et donc, par conséquent, des attracteurs saisonniers (fleurs, champignons...) et d'autres permanents (sentiers, bancs...).
- La présence de l'aléa nécessite la génération d'une couche pour les densités mensuelles des tiques dans la forêt de Sénart.

- 20 En somme, la simulation du contact spatio-temporel entre les humains et les tiques (simulation de l'exposition à l'aléa) se base sur la combinaison de ces trois cartes et fait partie des aspects en cours de développement de cette recherche. Ce type de simulation nous permettra de reproduire les comportements prédictibles de diverses catégories d'utilisateurs de la forêt. En nous appuyant sur ces simulations, nous visons à développer un outil d'analyse (ou de comparaison) de scénarios d'intervention des autorités de santé publique ou des responsables de la forêt, comme nous l'avons fait au Québec pour l'étude de la propagation du virus du Nil occidental dans le projet VNO-MAGS (Bouden, Moulin et Gosselin, 2008).

Conclusion

- 21 L'étendue des définitions atteste des difficultés de formaliser la notion d'émergence. Les auteurs ne s'entendent pas sur une définition même si chacun évoque tour à tour une augmentation de l'incidence comme critère déterminant pour la reconnaissance du caractère émergent d'une maladie. Récemment des vétérinaires, B. Toma et E. Thiry, ont apporté un nouvel éclairage épistémologique en insistant sur les caractéristiques d'espace et de temps correspondants à l'émergence. Pour étayer cette interprétation, ils rappellent que « *par définition une maladie n'est émergente que dans un cadre spatio-temporel donné* » (Toma et Thiry, 2003). Ainsi la variété des contextes régionaux ou locaux est à même de

produire des conditions d'émergence sachant que des facteurs de différents ordres (biologique, climatique, sociologique, économique, politique) peuvent grandement intervenir dans ce processus. Par exemple, la borréliose de Lyme revêt un caractère émergent ou ré-émergent dans certaines régions du monde, mais pas en tout point du globe. Cependant, la maladie suscite toute une série de questions et de préoccupations qui sont pour la plupart fondées sur des constats ou des recueils de cas auprès de médecins ; des études ciblées doivent permettre une connaissance précise de sa manifestation et de son incidence. Par ailleurs, des modes traditionnels ou nouveaux de fréquentation de l'espace ne sont-ils pas responsables ou à l'origine d'une réémergence ou émergence potentielle de cette maladie dans un contexte écologique stable ou en mutation ? Un constat s'impose de façon évidente : l'homme, en tant qu'être social, est ici à la fois « *acteur et victime* » (Handschemacher et Hervouët, 2004). Si la question que pose l'intitulé de cet article « *La borréliose de Lyme : un risque sanitaire émergent dans les forêts franciliennes ?* » demeure encore sans réponse, notre étude tente d'approcher localement, à l'échelle d'un petit massif forestier (3 200 ha), l'interaction spatiale entre un agent pathogène et un comportement social pour appréhender l'éventuelle émergence d'un risque sanitaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Aeschlimann A., 1972, « *Ixodes ricinus*, Linné, 1758 (*Ixodoidea ; Ixodidae*) L. Essai préliminaire de synthèse sur la biologie de cette espèce en suisse », *Acta tropica*, vol. 29, No.4, 321-340.
- Allan B.F., Keesing F., Ostfeld R.S., 2003, « Effect of forest fragmentation on Lyme disease risk », *Conserv. Biol.*, vol. 17, No.1, 267-272.
- Amat-Roze J.-M., 2004, « Les risques sanitaires », in : Wackermann G. (ed.), *La géographie des risques dans le monde*, Paris, Ellipses.
- Amat-Roze J.-M., Rémy G., 1983, « Paysage épidémiologique du paludisme dans l'espace Ivoir-Voltaïque », in : De l'épidémiologie à la géographie humaine, Table-ronde « Tropiques et santé », Bordeaux, 4-6 octobre 1982, *Travaux et documents de géographie tropicale*, No.48, ACCT/CEGET, Paris, 313 p.
- Anderson J.-F., Doby J.-M., Couatarmanac'h A., et al., 1986, « Différences antigéniques entre des souches de *Borrelia burgdorferi* isolées d'*Ixodes ricinus* en Bretagne », *Méd. Mal. Inf.*, vol. 16, No.3, 171-175.
- Antoni J.-P., Frankhauser P., 2008, « Modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités urbaines : l'exemple de MobiSim », *Actes du XLVe colloque de l'ASRDLF*, 25-27 août 2008, Canada, 15 p.
- Artzrouni M., Gouteux J.P., 2001, « Population dynamics of sleeping sickness: A microsimulation », *Simulation and Gaming*, vol. 32, No.2, 215-227.
- Bacon R.M., Kugeler K.J., Mead P.S., 2008, « Surveillance for Lyme Disease - United States, 1992-2006 », *Surveillance Summaries*, vol. 57, No.10, 1-9.

- Badeig F., 2010, *Un environnement actif pour la simulation multi-agents. Application à la gestion de crise dans les transports*, Thèse de doctorat d'informatique, Université de Paris-Dauphine, 248 p.
- Benenson I., Torrens P.M., 2004, *Geosimulation : Automata-Based Modeling of Urban Phenomena*, Chichester, John Wiley & Sons.
- Blancou J., Chomel B., Belotto A., et al., 2005, « Emerging or re-emerging bacterial zoonoses: factors of emergence, surveillance and control », *Vet. Res.*, vol. 36, No.3, 507-522.
- Bouden M., Moulin B., Gosselin P., 2008, « The geosimulation of West Nile Virus propagation : a tool for risk management in public health », *International Journal of Health Geographics*, vol. 7, No. 35, 1-19.
- Chapuis J-L., Ferquel E., Patey O., Vourc'h G., Cornet M., 2010, « Borréliose de Lyme : situation générale et conséquences de l'introduction en Île-de-France d'un nouvel hôte, le tamia de Sibérie », *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, Hors-série, 14 septembre, 6-8.
- Chapuis J.L., 2005, « Répartition en France d'un animal de compagnie naturalisé, le tamia de Sibérie (*Tamias sibiricus*) », *Rev. Ecol. (terre et vie)*, vol. 60, 239-253.
- Cornet M., Ferquel E., 2008, *Rapport interne d'activité*, CNR des *Borrelia*, Paris, Institut Pasteur, 68 p.
- Curtis S., 2004, *Health and Inequality*, London, Sage Publications Ltd.
- Duncan C., Jones K., Moon G., 1993, « Do places matter? A multi-level analysis of regional variation in health related behaviour in Britain », *Social Science and Medicine*, vol. 37, No.6, 725-733.
- Fassi Fehri M.M., 2001, *Les maladies émergentes, dérives des rapports de l'homme avec la nature*, Rabat, Edition Scriptura.
- Ferber J., 1995, *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*, Paris, InterEditions.
- Ferquel E., Garnier M., Marie J. et al., 2006, « Prevalence of *Borrelia burgdorferi* sensu lato and *Anaplasmatidae* members in *Ixodes ricinus* ticks in Alsace, a focus of Lyme borreliosis endemicity in France », *Appl Environ Microbiol.*, vol. 72, No.4, 3074-3078.
- García López D., 2010, *Modélisation de l'émergence de maladies infectieuses : exemple de la dengue*, Thèse de physique, UPMC, 224 p.
- George J.-C., Chastel C., 2002, « Maladies vectorielles à tiques et modifications de l'écosystème en Lorraine », *Bull. Soc. Pathol. Exot.*, vol. 95, No.2, 95-99.
- Gilbert N., Troitzsch K., 2005, *Simulation for the social scientist*, New-York, Open University Press, 2nd ed.
- Gray J.S., 1991, « The development and seasonal activities of the tick *Ixodes ricinus*: a vector of Lyme borreliosis », *Rev. of Med. and Veter. Entomol.*, vol. 79, No.6, 323-333.
- Guy N., 2007, « Maladie de Lyme : bases fondamentales à l'origine des mesures préventives, mesures de prévention primaire et secondaire », *Méd. Mal. Infect.*, vol. 37, No.7-8, 381-393.
- Handschumacher P., Hervouët J.-P., 2004, « Des systèmes pathogènes à la santé publique : une nouvelle dimension pour la géographie de la santé tropicale », *Autrepart*, No.29, 47-63.
- Handschumacher P., Laffly D., Hervouët J.-P., 2003, « De l'écologie des maladies à la mise en évidence d'indicateurs de risques sanitaires. Pour une géographie appliquée à la santé publique en Afrique sub-saharienne », *Historiens et géographes*, No.382, 129-138.

Hervouët J.-P., Handschumacher P., Laffly D., 2004, « Mobilités et espaces partagés au centre des risques sanitaires. L'exemple des grandes endémies tropicales », in : David G. (Ed.), *Espaces tropicaux et risques. Du local au global*, Actes des Xe journées de géographie tropicale, Orléans, 24-26 sep. 2003, CEDETE, Orléans/IRD, 127-136.

Hervouët J.-P., 2003, « Mobilités et espaces partagés au centre des risques sanitaires. L'exemple des grandes endémies tropicales », *Journées de géographie tropicale, Espaces tropicaux et risques : du local au global*, Orléans, 24-26 septembre.

InVS, 2005, *La maladie de Lyme. Données du réseau de surveillance de la maladie en Alsace*. Mars 2001-Février 2003, Saint-Maurice, Institut de Veille Sanitaire.

Laperriere V., Badariotti D., Banos A., Muller J.-P., 2009, « Structural validation of an individual-based model for plague epidemics simulation », *Ecological Complexity*, vol. 6, No.2, 102-112

Levine J.F., Wilson M.L., Spielman A., 1985, « Mice as reservoirs of the Lyme disease spirochete », *The American journal of tropical medicine and hygiene*, vol. 34, No.2, 355-360.

Lindgren E., Tälleklint L., Polfeldt T., 2000, « Impact of climatic change on the Northern latitude limit and population density of the disease-transmitting European tick *Ixodes ricinus* », *Environ. Health Perspect.*, vol. 108, No.2, 119-23.

Letrillart L., Ragon B., Hanslik T., Flahault A., 2005, « Lyme disease in France: a primary care-based prospective study », *Epidemiol. Infect.*, vol. 133, No.5, 935-942.

Macintyre S., Maciver S., Soomans A., 1993, « Area, class and health: should we be focusing on places or people », *Journal of Social Policy*, vol. 22, No.2, 213-234.

Maresca B., 2000, *La fréquentation des forêts publiques en Île-de-France. Etude réalisée dans le cadre de l'évaluation du contrat de plan Etat-Région 1994-1999 de l'Île-de-France*, Paris, Credoc..

Méha C., Godard V., Gramond D., 2010. « Forêts et santé : identification d'indicateurs spatiaux de foyers épidémiologiques. Exemple de la borrélie de Lyme en forêt de Sénart », in Galochet M., Glon E., 2010, *Des milieux aux territoires forestiers*, Lille, 15-17 octobre 2008, Artois Presse Université, 323-336.

Moigneu T., 2005, *Gérer les forêts périurbaines*, Paris, ONF.

Morin E., 1990, *Introduction à la pensée complexe*, Paris, Editions Sociales Françaises.

Morse S.S., 1995, « Factors in the emergence of infectious diseases », *Emerg Infect Disease*, vol. 1, No.1, 7-15.

Moulin B., Chaker W., Perron J., et al., 2003, « MAGS Project: Multi-agent geosimulation and crowd simulation », in the proceedings of the COSIT'03 Conference: *Spatial Information Theory*, Springer Verlag LNCS 2825, 151-168

Nupp T.E., Swihart R.K., 1998, « Effects of forest fragmentation on population attributes of white-footed mice and eastern chipmunks », *J. of Mammol.*, vol. 79, No.4, 1234-1243.

OCDE, 2003, *Les risques émergents au XXI^e siècle. Vers un programme d'action*, Paris, Editions OCDE.

Pavlovsky E.N., 1966, *The Natural Nidality of Transmissible Diseases*, Urbana, University of Illinois Press.

Perez-Eid C., 2001, « Déterminisme de distribution géographique des maladies transmises par les tiques », *Méd. Mal. Infect.*, vol. 31, No.2, 184-187.

Perron J., 2004, « MAGS : une plate-forme de géo-simulation à base d'agents logiciels pour la simulation de foule », *Géomatique 2004 conférence*, Montréal.

- Picheral H., 1983, Complexes et systèmes pathogènes : approche géographique, in : De l'épidémiologie à la géographie humaine, Table-ronde « Tropiques et santé », Bordeaux, 4-6 octobre 1982. *Travaux et documents de géographie tropicale*, No.48, ACCT/CEGET, Paris, 313 p.
- Postic D., Baranton G., 2006, « Prévalence de l'infection des tiques *Ixodes ricinus* par *Borrelia burgdorferi* sl en Alsace, corrélation avec l'incidence de la maladie », *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire*, No.27-28, 201-202.
- Postic D., Ferquel E., 2006, *Rapport interne d'activité*, CNR des *Borrelia*, Paris, Institut Pasteur, 65 p.
- Postic D., Ferquel E., 2005, *Rapport interne d'activité*, CNR des *Borrelia*, Paris, Institut Pasteur, 30 p.
- Randolph S.E., 2003, « Faune, climat et politique : Causes possibles aux récents accroissements des zoonoses à tiques », *Annales de l'Institut Pasteur/actualités*, No.16, 109-120.
- Randolph S.E., 2001, « The shifting landscape of tick-borne zoonoses: tick-borne encephalitis and Lyme borreliosis in Europe », *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 356, No.1411, 1045-1056.
- Rémy G., 1988, *Paysages et milieux épidémiologiques dans l'espace Ivoir-burkinabé*, Paris, Editions du CNRS.
- Rodhain F., 2008, « L'écologie des systèmes vectoriels : une somme de complexités », *Med. Trop.*, vol. 68, No.3, 226-230.
- Rodhain F., 2003, « Emergences de maladies à transmission vectorielle », *Epidémiol. et santé anim.*, No.43, 33-49.
- Rodhain F., 2000, « Emergence et ré-emergence des maladies infectieuses », *Actes du FIG, Géographie et Santé*, http://fig-st-die.education.fr/actes/actes_2000/rodhain/article.htm, 28 juin 2010.
- Schwartz M., Rodhain F., 2008, « Les nouvelles maladies infectieuses. Comment y faire face ? », *Questions de santé publique*, No.3, 4 p.
- Sorre M., 1933, « Complexes pathogènes et géographie médicale », *Annales de Géographie*, vol. 42, No.235, 1-18.
- Spielman A., Wilson M.L., Levine J.F., et al., 1985, « Ecology of *Ixodes dammini*-borne human babesiosis and Lyme disease », *Ann. Rev. Entomol.*, vol. 30, 439-460.
- Steere A.C., Malawista S.E., Hardin J.A., et al., 1977, « *Erythema chronicum migrans* and Lyme arthritis, the enlarging clinical spectrum », *Ann. Intern. Med.*, vol. 86, No.6, 685-698.
- Talaro K.P., 2005, *Foundations in microbiology*, 5th Ed., New York, McGraw-Hill Companies, Inc.
- Toma B., Thiry E., 2003, « Qu'est ce qu'une maladie émergente ? », *Epidémiol. et santé anim.*, No.44, 1-11.
- Valenciano M., 2002, *Définition des priorités dans le domaine des zoonoses non alimentaires 2000-2001*, Saint-Maurice, Institut de Veille Sanitaire.
- Veyret Y., 2004, *Territoires et risques naturels en France*, Paris, Hatier.
- Vor T., Kiffner C., Hagedorn P., Niedrig M., Rühle F., 2009, « Tick burden on European roe deer (*Capreolus capreolus*) », *Exp. Appl. Acarol.*, vol. 51, No.4, 405-417.
- Ward S.E., Brown R.D., 2004, « A framework for incorporating the prevention of Lyme disease transmission into the landscape planning and design process », *Landscape and Urban Planning*, vol. 66, No.2, 91-106.

NOTES

1. Les CDC ou « centres de contrôle et de prévention des maladies » forment ensemble la principale agence gouvernementale américaine en matière de protection de la santé publique et de sécurité publique.
2. Exprimée en taux, l'incidence correspond au pourcentage de cas dans une population sur une période donnée.
3. Traduit de l'anglais: « *diseases of infectious origin whose incidence in humans increased within the past two decades or threatens to increase in the near future* ».
4. Classification et distinction des maladies
5. Hervouët, 1987, cité dans Handschumacher et Hervouët (2004), « Des Systèmes Pathogènes à la Santé Publique : une nouvelle dimension pour la géographie de la santé tropicale », *Autrepart*, 29, p. 47-63.
6. Interview réalisée par Claire Manicot, rédactrice en chef du magazine Porphyre, le 13 juin 2008. Site web : <http://porphyre.wk-pharma.fr/blogs/?p=44>, consulté le 25 novembre 2009.
7. Agence de la santé publique du Canada, « *La maladie de Lyme se répand au Canada* », Relevé des maladies transmissibles au Canada (RMTCC), édition hebdomadaire du 12 juin 2009, volume 2, numéro 23, accessible en ligne : <http://www.phac-aspc.gc.ca/ccdrw-rmtch/2009/ccdrw-rmtcs2309-fra.php>, consulté le 29 novembre 2009.
8. La compétence de cette espèce réservoir pour *B. burgdorferi* sl n'est plus à démontrer (Levine et al., 1985).
9. Partenariats Institutions Citoyens Pour la Recherche et l'Innovation (PICRI) : « Epidémiologie de la borréliose de Lyme dans les forêts franciliennes et actions de prévention », convention n° 09003396 et n° 09003402.
10. Pour plus de détails sur la méthode, le lecteur pourra se reporter à Méha C., Godard V., Gramond D., 2010, « Forêts et santé : identification d'indicateurs spatiaux de foyers épidémiologiques. Exemple de la borréliose de Lyme en forêt de Sénart ». In Galochet M., Glon E., 2010. *Des milieux aux territoires forestiers*. Lille, 15 au 17 octobre 2008, Artois Presse Université, p. 323-336.

RÉSUMÉS

Largement répandue dans les régions tempérées de l'hémisphère nord, la borréliose de Lyme est la maladie à transmission vectorielle la plus fréquente sur l'ensemble de son aire de distribution. Depuis sa mise en évidence chez l'Homme en 1977, elle est considérée comme une maladie émergente, car son incidence a rapidement augmenté au cours des dernières décennies. En revenant préalablement sur la notion d'émergence, nous avons discuté du caractère émergent de cette affection. Il nous paraît alors difficile de vouloir généraliser l'émergence tant il existe une variété de situations et de contextes (géographique, biologique, socio-économique). Actuellement, la borréliose de Lyme semble poser une nouvelle problématique de santé publique dans les espaces fortement urbanisés, et ce, en raison d'une forte concentration humaine et de la capacité polarisante des grands massifs forestiers périurbains. Cette crainte d'une augmentation du risque, qui est en cours d'évaluation, est exprimée de façon importante en région Île-de-

France, et en particulier autour de la forêt de Sénart. Une étape de l'anticipation du risque de borréliose de Lyme est alors conduite par la nécessité de prendre en considération les expositions et les facteurs de risque. Ainsi la mise en évidence de contacts entre les itinéraires de déplacement des usagers en forêt et les espaces et environnements dits à « risque » constitue de fait une voie privilégiée. L'intérêt étant de spatialiser ce contact et de réfléchir à comment minimiser le risque sur le plan paysager.

Lyme borreliosis is the most prevalent and widespread vector-borne disease in temperate zones of the northern hemisphere. It has been considered as an emerging disease, since its recognition as a distinct clinical entity in 1977, and its incidence has increased rapidly during the past decades. In this paper, we briefly examine the emerging character of the disease, first by defining the notion of emergence which is too often ambiguous. From a strict epidemiological standpoint, it is almost impossible to generalize its emergence, especially considering the great variety of situations and contexts (geographical, biological, socio-economic). Presently, Lyme borreliosis seems to pose a new public health problem in heavily urbanized areas due to high population densities and a large number of people that visit urban forests. The hypothesis of an increase in contamination, which is work in progress, is very likely to appear in the Île-de-France region, especially around the forest of Sénart. In order to anticipate potential disease outbreaks in infected areas, it is necessary to consider exposure and risk factors. The analysis of contacts between the itineraries that people adopt in forests and the spaces and environments considered to be "risky" constitutes a privileged avenue of study. Consequently, there is a need to study these spatial dynamics (and to model this kind of contact), as well as to study ways in which it is possible to minimize risk by modifying the landscape.

INDEX

Mots-clés : émergence, risque sanitaire, forêt de Sénart, périurbain, borréliose de Lyme, vulnérabilité, Île-de-France

geographyun 908, 926, 250

Keywords : emergence, health risk, forest of Sénart, suburb, Lyme borreliosis, vulnerability

AUTEURS

CHRISTELLE MÉHA

Doctorante en géographie, ATER, Université de Paris-Sorbonne (Paris IV), UMR 8185 ENeC (Espaces, Nature et Culture), France
christelle.meha@sfr.fr

VINCENT GODARD

Professeur de géographie, Université Paris 8, UMR 7533 LADYSS (Laboratoire Dynamiques Sociales et Recomposition des Espaces), France
vgodard@univ-paris8.fr

BERNARD MOULIN

Professeur d'informatique, Université Laval (Québec), Groupe de recherche en informatique cognitive (GRIC, Université Laval), Canada
bernard.moulin@ift.ulaval.ca

HEDI HADDAD

Maître de conférences en Informatique, Université Al-Imam Saud Riyad, Saudi Arabia

Groupe de recherche en informatique cognitive (GRIC, Université Laval), Canada

hedi.haddad.1@ulaval.ca