

Université de Montréal

# **Modélisation des patrons spatiotemporels de l'émergence de la maladie de Lyme au Québec**

par Marc-Antoine Tutt-Guérrette

Département de médecine sociale et préventive  
École de santé publique

Mémoire présentée  
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise ès sciences (M. Sc.)  
en santé publique  
option recherche

Juillet 2019

© Marc-Antoine Tutt-Guérrette, 2019

Université de Montréal  
Département de médecine sociale et préventive, École de santé publique

---

*Ce mémoire intitulé*

**Modélisation des patrons spatio-temporels de l'émergence de la maladie de Lyme au  
Québec**

*Présenté par*

**Marc-Antoine Tutt-Guérrette**

*A été évalué par un jury composé des personnes suivantes*

**Marc-André Verner**

Président-rapporteur

**Kate Zinszer**

Directrice de recherche

**Yan Kestens**

Codirecteur

**Marie-Line Gilbert**

Membre du jury

## Résumé

La maladie de Lyme est une problématique d'actualité au Québec. Son émergence depuis la dernière décennie est vraisemblablement associée à des facteurs environnementaux et anthropiques qui favorisent la survie d'*Ixodes scapularis* et augmentent les risques d'exposition à ce vecteur de la maladie de Lyme. L'objectif de ce mémoire était d'estimer la vitesse et la direction de l'émergence de la maladie de Lyme au Québec et d'identifier les risques spatiotemporels. Une analyse de surface de tendance a été effectuée pour estimer la vitesse et la direction de son émergence en tenant compte du premier cas déclaré de maladie de Lyme pour chaque municipalité depuis 2004. Une analyse d'agrégats a aussi été effectuée pour identifier les régions à risque dans l'espace et le temps. Ces analyses ont été réalisées à la fois pour la date du début des symptômes et la date de déclaration de chaque cas de maladie de Lyme. Il est estimé que la maladie de Lyme se propage vers le nord du Québec à une vitesse variant entre 16 et 32 km/année selon la date de déclaration et la date de début des symptômes, respectivement. Un taux élevé de risque de maladie a été identifié dans sept agrégats au sud-ouest du Québec dans les régions sociosanitaires de la Montérégie et de l'Estrie. Les résultats obtenus dans cette étude amélioreront notre compréhension des patrons spatiotemporels de la maladie de Lyme au Québec, et pourront être utilisés dans des interventions proactives et ciblées par les autorités cliniques et de la santé publique.

**Mots-clés :** Maladie de Lyme, Québec, patrons spatiotemporels, vitesse, agrégats, émergence

## Abstract

Lyme disease is a current public health threat in Quebec. Its emergence over the last decade is likely caused by environmental and anthropological factors that favour the survival of *Ixodes scapularis* and increase the risk of exposure to this Lyme disease vector. The objective of this thesis was to estimate the speed and direction of Lyme disease emergence in Quebec and to identify spatiotemporal risk. A surface trend analysis was conducted to estimate the speed and direction of its emergence based upon the first detected case of Lyme disease in each municipality since 2004. A cluster analysis was also conducted to identify at-risk regions across space and time. These analyses were reproduced for the date of disease onset and date of notification for each case of Lyme disease. It was estimated that Lyme disease is spreading northward in Quebec at a speed varying between 16 and 32 km/year according to the date of notification and the date of disease onset, respectively. A high rate of disease risk was found in seven clusters identified in the southwest of Quebec in the sociosanitary regions of Montérégie and Estrie. The results obtained in this study improve our understanding of the spatiotemporal patterns of Lyme disease in Quebec, that can be used for proactive, targeted interventions by public and clinical health authorities.

**Keywords** : Lyme disease, Quebec, spatiotemporal patterns, velocity, cluster, emergence

## Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des sigles.....	vii
Remerciements.....	ix
Introduction.....	1
Épidémiologie de la maladie de Lyme.....	2
Cycle de vie.....	3
Transmission, symptômes et traitement.....	4
Surveillance et prévention.....	6
Déterminants environnementaux de l'écologie de la maladie de Lyme.....	8
Changements climatiques.....	8
Fragmentation environnementale.....	9
Déterminants anthropiques de cas humains de Lyme et facteurs de risques.....	10
Occupations professionnelles.....	10
Activités de plein air.....	10
Patrons spatiotemporels.....	11
Objectifs de recherche.....	13
Objectif 1.....	13
Objectif 2.....	13
Méthodes.....	14
Bases de données.....	14
Cas déclarés de maladie de Lyme.....	14
Cas confirmé.....	15
Cas probable.....	15
Population par municipalité.....	15
Fichiers SIG.....	16
Analyse de surface de tendance.....	16

Analyse d'agrégats .....	18
Résultats .....	19
Épidémiologie descriptive.....	19
Analyse de surface de tendance.....	25
Analyse d'agrégats .....	28
Discussion.....	33
Conclusion.....	41
Références.....	i
Annexe A.....	xi
Annexe B .....	xii
Annexe C .....	xiii
Annexe D.....	xiv
Annexe E.....	xxi

## Liste des figures

Figure 1. Nombre de cas cumulés de maladie de Lyme au Québec par année de déclaration, 2006 – 2018 (N = 727) .....	21
Figure 2. Nombre de cas cumulés de maladie de Lyme au Québec par année de début des symptômes, 2006 – 2018 (N = 693) .....	22
Figure 3. Nombre de cas de maladie de Lyme au Québec selon l'année du début des symptômes, 2006 – 2018 (N = 693) .....	23
Figure 4. Nombre de cas de maladie de Lyme déclaré au Québec par date de déclaration, distribué par sexe et groupe d'âge, 2006 – 2018 (N = 727).....	24
Figure 5. Vitesse d'émergence de la maladie de Lyme au Québec pour 128 municipalités, par date de début des symptômes (2006 – 2018).....	26
Figure 6. Vitesse d'émergence de la maladie de Lyme au Québec pour 138 municipalités, par date de déclaration (2006 – 2018).....	27
Figure 7. Agrégats spatiotemporels de cas de maladie de Lyme au Québec entre 2006 et 2018 selon la date de début des symptômes.....	29
Figure 8. Agrégats spatiotemporels de cas de maladie de Lyme au Québec entre 2006 et 2018 selon la date de déclaration.....	31

## Liste des tableaux

Tableau 1.	Identification des définitions de cas de maladie de Lyme par catégories.....	17
Tableau 2.	Variables des agrégats spatiotemporels de la Figure 7 .....	30
Tableau 3.	Variables des agrégats spatiotemporels de la Figure 8 .....	32



## Liste des sigles

CDC :	Centers for Disease Control and Prevention
CIUSSS :	Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux
DPH :	Connecticut State Department of Public Health
ECDC :	European Centre for Disease Prevention and Control
EIA :	Essai immunoenzymatique
IgG :	Immunoglobuline G
IgM :	Immunoglobuline M
INSPQ :	Institut national de santé publique du Québec
IUCN :	International Union for Conservation of Nature
MADO :	Maladie à déclaration obligatoire
MDDELCC :	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MSSS :	Ministère de la Santé et des Services sociaux
NIOSH:	National Institute for Occupational Safety and Health
OMS :	Organisation mondiale de la santé
RR :	Risque relatif

*"All we have to decide is what to do with the time that is given us."*

- J.R.R. Tolkien

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à sincèrement remercier mes directeurs de recherche, les professeurs Kate Zinszer et Yan Kestens, pour leur conseil, leur soutien, mais surtout leur patience, sans qui ce mémoire ne se serait jamais réalisé.

Un profond merci à Katherine Hébert pour m'avoir à maintes reprises offert son assistance technique à des moments de confusion et d'incertitude, et à Mengru Yuan pour son aide en biostatistiques. Je remercie l'Institut national de santé publique du Québec pour nous avoir permis d'utiliser leurs données, ainsi que Patrick Leighton, qui nous a mis en contact avec l'institut.

De l'enfance à l'âge adulte, je remercie ma mère pour son appui et ses encouragements, dont les qualités qui demeurent inébranlables même face aux épreuves sont une source d'inspiration.

Pour mon père, à mes côtés tout au long de ma vie en temps de bonheur et de chagrin, avec qui je ne pourrai désormais partager ce moment de réussite émanant du parcours qui lui apporta tant de fierté. À qui je dois l'homme que je suis devenu, c'est à toi, pa', mon meilleur ami, que je dédie ce mémoire.

## Introduction

Nous vivons une époque où nous sommes assurément plus que jamais conscients des impacts que causent les bouleversements environnementaux anthropiques sur la santé. Les changements climatiques, en particulier le réchauffement climatique, influencent de manière importante les caractéristiques épidémiologiques des maladies à transmissions vectorielles (Campbell-Lendrum, Manga, Bagayoko et Sommerfeld, 2015; Githeko, Lindsay, Confalonieri et Patz, 2000). La température est un facteur déterminant pour la transmission de maladie, et un réchauffement planétaire facilite l'établissement de maladies vectorielles dans des régions autrefois dépourvues de celles-ci. En effet, nous observons à l'échelle globale l'apparition de nouvelles maladies à transmission vectorielle, ainsi qu'un dérèglement écologique chez celles qui sont endémiques (ECDC, 2009; OMS, 2014). Nous pouvons aussi attribuer ces impacts sur la santé à l'urbanisation, la fragmentation environnementale, le développement des sols, à la globalisation, et à de mauvaises conditions sanitaires (Foley et al., 2005; OMS, 2014). Alors que ce sont ces perturbations environnementales qui dirigent les patrons écologiques de ces maladies, l'apparition de cas est aussi influencée par les activités humaines qui accroissent les risques d'expositions, par le degré de sensibilisation des régions atteintes, et de l'efficacité de leurs systèmes de préventions (Sutherst, 2004).

Les maladies à transmission vectorielles les plus notoires incluent le paludisme, la dengue, le chikungunya et le Zika, qui, parmi tant d'autres, causent plus d'un million de décès par année globalement (OMS, 2014). L'émergence, ou la réémergence de celles-ci peuvent provoquer des éclosions dévastatrices. À l'échelle mondiale, les plus importantes maladies à transmission vectorielles sont notamment les arbovirus transmis par les moustiques des espèces *Aedes*, incluant

la dengue, le chikungunya, et le Zika en Amérique du Sud et en Afrique (Mayer, Tesh et Vasilakis, 2017; OMS, 2017). En Amérique du Nord, nous observons une émergence importante du virus du Nil occidental et de la maladie de Lyme, cette dernière étant d'ailleurs la maladie vectorielle la plus prévalente dans l'hémisphère nord (Kilpatrick et Randolph, 2012; OMS, 2014). Depuis quelques décennies, l'incidence globale de la maladie de Lyme est en hausse et est particulièrement en émergence au Canada (OMS, 2014; Stone, Tourand et Brissette, 2017).

### **Épidémiologie de la maladie de Lyme**

Les régions les plus affectées par la maladie de Lyme sont les États-Unis, l'Europe et certains pays asiatiques. En 2017, l'incidence mondiale de la maladie de Lyme était estimée être plus de 530 000 cas par année, un fardeau significatif (OMS, 2017). En Amérique du Nord, la maladie est principalement retrouvée aux États-Unis, et le Centers for Disease Control and Prevention démontre que l'incidence est élevée dans 16 états du nord-est du pays : en 2017 un total de 42,743 cas ont été déclarés dans ces états (CDC, 2018). Historiquement, la maladie de Lyme fut identifiée en 1982 dans la ville de Lyme, au Connecticut, lorsqu'un taux inhabituellement élevé d'arthrite à la fois chez les enfants et les adultes fut reporté en 1975 (DPH, 2018). Au Canada, la maladie est en pleine émergence, et les premiers cas humains de Lyme furent déclarés à la fin des années 1980 au sud de l'Ontario (Ogden, Lindsay, Morshed, Sockett et Artsob, 2009). Aujourd'hui, la maladie est principalement retrouvée en Ontario, en Nouvelle-Écosse, et au Québec (Gouvernement du Canada, 2017b). Alors qu'elle se propageait progressivement au Canada, il fut obligatoire à partir de 2003 de déclarer les cas de maladie de Lyme au Québec, où le nombre de cas déclarés annuellement depuis lors a augmenté de manière exponentielle (MSSS, 2019). En 2017, 248 cas furent déclarés au Québec, la majorité en provenance de l'Estrie et de la Montérégie, et le taux d'incidence annuel observé a plus que quadruplé en seulement cinq ans dans la province, de 0,40 cas par 100 000 en

2011 à 1,87 cas par 100 000 en 2015 (INSPQ, 2017a; MSSS, 2019). La majorité des cas déclarés se retrouvent au nord et à l'ouest de l'Estrie, dans presque l'entièreté de la Montérégie, au sud-ouest de la Mauricie et du Centre-du-Québec, et au sud-ouest de l'Outaouais (MSSS, 2019).

### Cycle de vie

Les bactéries responsables de la maladie de Lyme sont les spirochètes *Borrelia burgdorferi* au nord-est des États-Unis et *Borrelia afzelii* et *Borrelia garinii* en Europe et en Asie (Steere, Coburn et Glickstein, 2004). En Amérique du Nord, plus particulièrement au nord-est des États-Unis, *B. burgdorferi* est transmis aux animaux et aux humains par la tique *Ixodes scapularis*, plus communément nommée tique à pattes noires (Steere et al., 2004). La distribution du vecteur *I. scapularis* est principalement dirigée par le cerf de Virginie, *Odocoileus virginianus*, et la souris à pattes blanches, *Peromyscus leucopus*, mais aussi par d'autres mammifères (Wood et Lafferty, 2013). Au Québec, la souris à pattes blanches n'est retrouvée qu'au sud-ouest de la province, principalement dans les régions de la Montérégie et de l'Estrie, jusqu'au sud des Laurentides et de l'Outaouais (IUCN, 2018b). Le cerf de Virginie est plus vastement répandu au Québec, recouvrant tout le sud de la province jusqu'au 50° parallèle nord (IUCN, 2018a). Le cycle de vie d'*I. scapularis* s'étend sur environ deux ans, durant laquelle elle se muera en trois stades. Elle doit se nourrir du sang de ces mammifères à chaque stade pour muer (CDC, 2011). Quand elle est une larve, elle se nourrit surtout sur les petits mammifères, dont *P. leucopus*, où elle se muera en nymphe (CDC, 2011; Wood et Lafferty, 2013). La nymphe se nourrit principalement sur *P. leucopus*, mais aussi sur de plus gros mammifères, où elle se muera enfin en adulte (CDC, 2011). L'adulte se nourrit sur les gros mammifères dont *O. virginianus*, le réservoir le plus important pour *I. scapularis* à ce stade (CDC, 2011). Référez-vous à l'Annexe A et B pour une représentation du cycle de vie d'*I. scapularis* et de la distribution géographique de ces réservoirs.

## **Transmission, symptômes et traitement**

Les tiques ne sont pas infectées par *B. burgdorferi* lorsqu'elles éclosent, mais plutôt quand elles se nourrissent d'un hôte infecté (Wood et Lafferty, 2013). La transmission du spirochète chez l'humain se fait donc par la pique d'une tique infectée, et la période d'incubation est de 3 à 32 jours (Heymann, 2004; Steere et al., 2004). La tique est incapable de sauter ou de voler, alors elle se dirigera en préférence vers les hautes herbes, mais peut se retrouver dans les boisées, les arbustes, et les amas de feuilles mortes, où elle attendra le passage d'un hôte qui se frotera contre elle, lui accordant alors l'opportunité de s'y attacher (MSSS, 2019). Au Canada, les risques d'exposition sont plus élevés pour les personnes âgées, notamment pour les personnes entre 55 et 74 ans, et les hommes sont plus à risque que les femmes (Ogden et al., 2015). Les symptômes de la maladie de Lyme sont vastes, mais la plus commune est un érythème migrant en forme de cible apparaissant là où la tique a mordu, présent chez 70 à 80% des cas (Québec, 2017). Cette démangeaison peut être accompagnée par une fatigue extrême, des maux de tête, de la faiblesse musculaire, ou des étourdissements dans les 30 jours suivant la pique (CIUSSS Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal, 2018; Gouvernement du Canada, 2017c).

Le diagnostic est souvent difficile à effectuer, car ces symptômes préliminaires peuvent facilement être confondus avec d'autres maladies, et le développement d'anticorps contre la maladie peut parfois prendre plusieurs semaines (CDC, 2019; NIH, 2018). Au Québec, les tests sérologiques sont effectués selon un algorithme à deux niveaux, consistant d'un essai immunoenzymatique (EIA) pour le dépistage des IgM et des IgG contre *B. burgdorferi*, suivi d'un Western Blot pour confirmer la présence de ces immunoglobines (INSPQ, 2016, 2017b). À ce stade de la maladie de Lyme, la sensibilité du dépistage est faible puisque les immunoglobines ne sont pas encore développées dans le corps, et l'érythème migrant est souvent mal identifié par les professionnels de la santé (Gasmi et al., 2017; Johnson et al., 2018). Gasmi et al (2017) ont souligné dans leur étude sur 50 patients

exposés à *I. scapularis* au Québec que 62.8% des cas atteints d'un érythème migrant furent possiblement mal diagnostiqués, et que 96.5% des traitements prophylactiques antibiotiques prescrits n'étaient pas justifiables selon les lignes directrices actuelles. De plus, 55.6% des demandes de tests sérologiques effectués par les cliniciens furent possiblement inutiles malgré la présence d'un érythème migrant et d'une exposition antécédente à une tique, qui sont des conditions suffisantes pour effectuer un diagnostic sans test sérologique (Gasmi et al., 2017).

Si la maladie demeure non traitée, les symptômes se manifestent en trois stades qui peuvent se chevaucher et durer plusieurs mois mêmes des années, causant des lésions cutanées ainsi que des troubles musculosquelettiques, cardiaques, et neurologiques; la complication la plus importante étant le développement de l'arthrite chez près de 40% des cas (Gouvernement du Canada, 2017a, 2018b; Ogden et al., 2015). Une condition chronique de la maladie de Lyme peut survenir chez certains patients même après avoir été traités, mais aucune preuve définitive ne démontre que les symptômes persistants indiquent une évolution de la maladie de Lyme (Gouvernement du Canada, 2018b). Une étude sur cette condition chronique souligne qu'environ 10% des patients diagnostiqués avec la maladie de Lyme continueront d'être atteints de troubles musculosquelettiques et neurologiques (Ścieszka, Dąbek et Cieślík, 2015). Référez-vous à l'Annexe C pour un tableau détaillé des symptômes.

Aucun vaccin contre la maladie de Lyme n'est présentement disponible. Une prophylaxie post-exposition contre la maladie de Lyme n'est généralement pas ordonnée au Québec sauf sous certaines conditions, soit : lorsqu'une pique se fait dans une municipalité où l'on retrouve une proportion de tiques infectées  $\geq 20\%$ , où l'on trouve en moyenne trois cas de maladie de Lyme, ou si l'incidence de la maladie de Lyme est de dix cas par 100 000 habitants dans ladite municipalité; le délai entre le retrait de la tique et la consultation médicale est  $\leq 72$  heures; la tique est restée accrochée à la peau pendant  $\geq 24$  heures (INSPQ, 2017b). Une dose unique à 200 mg de



doxycycline est recommandée pour les personnes  $\geq 12$  ans, alors qu'un total de 4mg/kg/jour divisé en 2 doses est recommandé pour les enfants entre 8 et 12 ans (INSPQ, 2017b). Pour les enfants de moins de 8 ans, il est recommandé d'observer les symptômes compatibles à la maladie de Lyme pendant 30 jours et de traiter le cas avec de l'amoxicilline (INSPQ, 2017b). L'efficacité du traitement prophylactique à la doxycycline est de 87% (INSPQ, 2017b). La prophylaxie post-exposition est généralement envisagée lorsqu'une piqure est survenue dans les régions de l'Estrie, de la Montérégie et en Outaouais (MSSS, 2019).

### **Surveillance et prévention**

Dotés de programmes de surveillance active et passive de tiques, c'est-à-dire la surveillance sur le terrain (active) et la collecte de tiques retrouvées sur les humains (passive), nous avons au Québec et au Canada une base de données extensive sur le nombre de tiques soumis par années aux laboratoires de santé publique (Adam-Poupart, Milord, Thivierge, Therrien et Irace-Cima, 2016; Gouvernement du Canada, 2017a). En tant que maladie à déclaration obligatoire (MADO), la surveillance de nouveaux cas se fait progressivement. Au Québec en particulier, le Ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) et l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) sont hautement impliqués à la collecte de données de cas déclarés de Lyme afin d'identifier et de surveiller les tendances épidémiologiques spatiotemporelles des risques d'acquisition de la maladie de Lyme en termes géographiques, démographiques, et environnementaux (INSPQ, 2019b; MSSS, 2019).

Les sources d'information sont diverses au Québec et nous pouvons facilement nous éduquer sur la maladie de Lyme. La population générale ainsi que les professionnels de la santé peuvent s'informer sur ce qu'est la maladie, comment elle se transmet, quelles sont ses symptômes et complications, et comment la traiter (INSPQ, 2019b; MSSS, 2019). En termes de prévention, les

autorités de santé publique recommandent certaines mesures pouvant grandement réduire les risques de piqûres de tiques. Pour toute activité en plein air, il est recommandé de demeurer dans les sentiers et éviter les herbes hautes, porter des souliers et des vêtements longs, bien les border pour éviter toutes ouvertures, et utiliser un insectifuge sur les parties exposées du corps (Québec, 2017).

Il existe plusieurs interventions pour contrôler les réservoirs et les vecteurs de la maladie de Lyme, tels la vaccination de souris, la chasse aux cerfs, le traitement de souris avec des acaricides, la pulvérisation de champignons entomopathogènes dans les pâturages, et la gestion des sols, mais l'efficacité de ces interventions est débattue (Kilpatrick et al., 2017; Kugeler, Jordan, Schulze, Griffith et Mead, 2016; Sokolow et al., 2019).

Aux médecins omnipraticiens et spécialistes et aux infirmières en milieu clinique, l'INSPQ offre une formation spécialisée sur la maladie de Lyme. Cette formation a comme objectif de décrire l'émergence de la maladie au Québec, d'identifier les facteurs de risques, les déterminants, et les mesures de préventions, ainsi que de décrire les manifestations cliniques afin d'améliorer la prise en charge des patients atteints de la maladie (INSPQ, 2019a). Au niveau populationnel, plusieurs ressources de sensibilisation sont disponibles en ligne et dans les médias, mais ne sont pas nécessairement accessibles par l'ensemble de la population. Une évaluation d'une campagne nationale de sensibilisation de la maladie de Lyme en 2014 démontre que le Québec ne s'est pas sensibilisé autant que le reste du Canada (Aenishaenslin, Bouchard, Koffi, Pelcat et Ogden, 2016; Gasmi et al., 2017). Le niveau actuel de sensibilisation au Québec n'a pas été évalué.

## Déterminants environnementaux de l'écologie de la maladie de Lyme

### *Changements climatiques*

La tique à pattes noires doit survivre deux hivers pour qu'elle s'installe de façon permanente dans une région (CDC, 2011), ce qui lui était auparavant impossible au Québec et au Canada en raison des saisons très froides. Entre 1961 et 2010, les températures au sud-ouest du Québec ont augmenté de 1.5 à 2.1°C, selon les régions, alors que la tendance des moyennes des températures les plus basses pour le mois de janvier, le plus froid de l'année, se rapproche ou surpassent -10°C (Gouvernement du Canada, 2018a; MDDELCC, 2016). Or, la mortalité des tiques diminue de manière drastique lorsque les températures demeurent au-dessus de -10°C (Eisen, Eisen, Ogden et Beard, 2016; Lindgren et Gustafson, 2001; Vandyk, Bartholomew, Rowley et Platt, 1996). Le Québec connaît d'ailleurs des conditions climatiques de plus en plus extrêmes, alors que des températures maximales records sont régulièrement enregistrées au sud de la province depuis déjà quelques années (MDDELCC, 2019). Les tiques hivernent généralement dans la litière de feuilles à la surface du sol, qui fournit une excellente couche d'isolation (Eisen et al., 2016). Même lors d'une vague de froid quand les températures peuvent descendre jusqu'à -30°C, la litière peut maintenir une température qui ne tombe pas bien loin au-dessous de 0°C (Eisen et al., 2016). Il est donc fortement accepté qu'un hiver plus doux diminue la mortalité des tiques et favorise sa dispersion (Dautel, Kämmer et Kahl, 2016; Lin et al., 2019).

Les niveaux de précipitations ont aussi augmenté depuis les années 1960, et il est prévu qu'ils continueront d'augmenter dans les années qui suivent (MDDELCC, 2018; Ogden, Maarouf, et al., 2006). Les précipitations règlent l'humidité, un facteur important de la survie des tiques, car elles requièrent un certain niveau pour ne pas dessécher (Gabriele-Rivet et al., 2015; Monaghan, Moore, Sampson, Beard et Eisen, 2015; Tran et Waller, 2013). En conséquence, des populations de

tiques à pattes noires deviennent endémiques au sud-ouest du Québec. Alors que ces changements climatiques ont promu la survie de la tique, ils ont aussi eu une influence importante sur la dispersion des réservoirs de la tique, plus particulièrement la souris à pattes blanches. Tout comme pour la tique, les hivers québécois lui étaient autrefois un facteur limitant, mais à présent nos conditions favorisent sa dispersion nordique (Roy-Dufresne, Logan, Simon, Chmura et Millien, 2013; Simon et al., 2014).

#### *Fragmentation environnementale*

La fragmentation environnementale influence en premier lieu les caractéristiques écologiques de certains réservoirs des tiques à pattes noires, comme la souris à pattes blanches et le cerf de Virginie. Nous observons d'ailleurs au sud du Québec, mais plus particulièrement dans la Montérégie, un développement considérable dans le secteur agroalimentaire depuis les dernières décennies, entraînant d'importantes coupes forestières (Cogliastro et D'Orangeville, 2007; Cormier, Côté, Mercure, Cerruti et Minelli, 2012; Soucy-Gonthier et al., 2003). Cette fragmentation diminue la biodiversité mammifère et végétale, tout en augmentant la densité des réservoirs de la tique (Allan, Keesing et Ostfeld, 2003; Clow et al., 2017; Rogic, Tessier, Legendre, Lapointe et Millien, 2013; Simon et al., 2014). La souris à pattes blanches est d'autant plus une espèce hautement influencée par ces changements, qui a tendance à se regrouper dans des zones de transitions, de sorte qu'elle se propage rapidement dans le sud du Québec où des populations à haute densité se retrouvent dans les régions grandement fragmentées (Fiset, Tessier, Millien et Lapointe, 2015; Marrotte, Gonzalez et Millien, 2017; Rogic et al., 2013; Simon et al., 2014). Les risques d'exposition aux tiques dans ces régions sont donc plus élevés, à la fois en fonction de la dispersion de ses réservoirs, mais aussi par les contacts plus fréquents liés aux activités humaines récréatives ou professionnelles.

## Déterminants anthropiques de cas humains de Lyme et facteurs de risques

### *Occupations professionnelles*

Alors que l'émergence de la maladie de Lyme au Québec est influencée par les changements climatiques et la fragmentation environnementale, l'apparition accélérée de cas dépend essentiellement des activités humaines qui accroissent le risque d'être exposé au vecteur (*Aenishaenslin, Bouchard, Koffi et Ogden, 2017*). Au Québec, le risque d'exposition aux tiques à pattes noires est particulièrement élevé dans les régions administratives de la Montérégie et de l'Estrie (*MSSS, 2019*). Comme illustré ci-dessus, la région administrative de la Montérégie a connu d'importants développements dans les secteurs de l'agroalimentaire et de la foresterie. Les travailleurs extérieurs œuvrant dans ces domaines sont davantage à risque d'être exposés à la maladie de Lyme, surtout lorsque leurs lieux de travail se situent là où la tique à pattes noires est endémique (*NIOSH, 2017; Richard et Oppliger, 2015; Schwartz et Goldstein, 1990; Shapiro, 2014*).

### *Activités de plein air*

Les risques sont aussi notables pour ceux qui participent aux activités récréatives dans ces régions. Dans les zones où se trouvent des populations endémiques de tiques, la probabilité de se faire piquer augmente de façon importante dans les espaces récréatifs (*Smith, Wileyto, Hopkins, Cherry et Maher, 2016*). Nous pouvons trouver une densité élevée de tiques bordant les sentiers dans les boisées et les forêts, particulièrement lorsque ceux-ci se retrouvent dans des régions fragmentées puisque la niche écologique disponible pour les tiques est restreinte (*Allan et al., 2003; Hahn et al., 2017*). Au Québec depuis la dernière décennie, la randonnée et le camping ont connu une croissance importante dans sa popularité, alors que nous avons observé une augmentation de 4.1% et de 9.9% dans le taux de fréquentation de séjour entre 2006 et 2010 pour la région de

Montérégie et des Cantons-de-l'Est (Estrie), respectivement (Camping Québec, 2018). De 2010 à 2018, le nombre d'emplacements de loisirs occupés par tous les types de campeurs a augmenté de 13.7% (Camping Québec, 2018).

### **Patrons spatiotemporels**

Une compréhension des patrons spatiotemporels d'une maladie à transmission vectorielle demeure un aspect fondamental à la conception d'un profil de son risque épidémiologique. L'épidémiologie spatiotemporelle peut servir en outre à étudier les risques d'une zoonose à travers le temps dans un contexte géographique, environnemental, comportemental, socioéconomique, ou démographique (Elliott et Wartenberg, 2004; Ostfeld, Glass et Keesing, 2005). Lors d'une éclosion, elle permet d'identifier les sources d'expositions, mais aussi de caractériser les régions à risque d'une maladie en termes d'espace et de temps (Ostfeld et al., 2005). Ceci est essentiel dans un contexte de santé publique afin de surveiller les tendances d'une maladie infectieuse et d'avoir les outils nécessaires pour mieux diriger les efforts d'intervention aux régions et aux individus les plus à risque. Plusieurs études spatiotemporelles sur la maladie de Lyme ont d'ailleurs été effectuées, explorant la distribution des cas humains, de ses vecteurs et de leurs réservoirs. La distribution des risques de la maladie de Lyme est d'ailleurs généralement bien définie dans la littérature, particulièrement celle de la tique à pattes noires. La distribution d'*I. scapularis* au Canada est décrite en détail, sa présence étant principalement limitée au sud-ouest du Québec, au sud-est de l'Ontario, et aux provinces maritimes (Cheng et al., 2017; Clow et al., 2017; Koffi et al., 2012; Ogden et al., 2010; Ogden, Mechai et Margos, 2013).

Un aspect intéressant est l'étude de la vitesse et de la direction d'émergence de la maladie de Lyme. Il est estimé que la vitesse d'émergence d'*I. scapularis* est en moyenne 46 km/année pour l'ensemble de sa distribution au Canada, et qu'après détection précoce de populations de tiques

dans une région, nous pouvons nous attendre à ce que la maladie de Lyme devienne émergente dans les cinq années qui suivent (Leighton, Koffi, Pelcat, Lindsay et Ogden, 2012; Ogden, Lindsay et Leighton, 2013). Il a aussi été démontré au sud du Québec que *B. burgdorferi* se propage vers le nord à une vitesse variant entre 3.5 et 11 km/année, et la souris à pattes blanches à environ 10 km/année (Roy-Dufresne et al., 2013; Simon et al., 2014). Les vitesses d'émergences d'*I. scapularis* et *B. burgdorferi* sont calculées par des modèles de régression linéaire basés sur le nombre de degrés-jours permettant d'estimer la probabilité de survie de la tique (Leighton et al., 2012; Simon et al., 2014). La vitesse de la souris à pattes blanches est estimée en modélisant sept modèles écologiques validés de manière croisée pour prédire sa distribution présente et future (Roy-Dufresne et al., 2013). Tous ces travaux sur la propagation spatiotemporelle ont porté sur *B. burgdorferi* et ses vecteurs, mais ni la vitesse ni la direction d'émergence des cas humains déclarés de maladie de Lyme n'ont été étudiées à ce jour.

La détection d'agrégat de cas de maladie de Lyme a quant à elle été réalisée en Amérique du Nord. Étant la maladie vectorielle la plus prédominante aux États-Unis depuis quelques décennies, la distribution géographique des cas de maladie de Lyme ainsi que les régions à risque d'acquisition ont été clairement définies pour le nord-est du pays depuis la fin des années 1970 (Bowen, Schulze et Parkin, 1984; Glavanakov et al., 2001; Kitron et Kazmierczak, 1997; Kugeler, Farley, Forrester et Mead, 2015; Steere et Malawista, 1979). A contrario, la maladie de Lyme ne fut classée maladie à déclaration obligatoire au Canada à un niveau national que depuis 2009, soit six ans après le Québec (Ogden et al., 2015). En tant que maladie émergente, nos efforts se sont surtout orientés vers la surveillance et l'étude des déterminants écologiques responsables de sa propagation, alors que l'identification d'agrégats spatiaux de cas n'en est qu'à ses débuts (Ogden et al., 2015). Notre compréhension de la distribution des cas au Canada, ainsi qu'au Québec, est limitée et doit être actualisée.

## **Objectifs de recherche**

La maladie de Lyme est une problématique émergente au Québec qui doit être adressée selon une approche en fonction de l'avenir, tout en surveillant son état actuel. Le Québec se compte parmi les provinces les plus exposées à la maladie de Lyme, et il est important de caractériser les patrons de son émergence afin d'améliorer l'efficacité de nos systèmes de prévention et mieux cibler nos campagnes de sensibilisation.

Ce présent mémoire vise à mieux comprendre et définir les patrons spatiotemporels de l'émergence et l'évolution endémique de la maladie de Lyme au Québec en termes de cas humains. Les objectifs spécifiques de recherche sont :

### **Objectif 1**

Estimer la vitesse de l'émergence des cas de maladie de Lyme dans la province de Québec à un niveau municipal. La vitesse et la direction de la diffusion des cas de maladie de Lyme au Québec déclarés entre 2004 et 2018 seront estimées à partir de données de 138 municipalités ayant reporté au moins un cas de maladie de Lyme durant cette période.

### **Objectif 2**

Identifier les agrégats de cas de maladie de Lyme à risque élevé au Québec à l'échelle annuelle et municipale. Des agrégats spatiotemporels seront estimés en utilisant le nombre cumulé de cas de maladie de Lyme entre 2004 et 2018 pour 138 municipalités.



# Méthodes

## Bases de données

### *Cas déclarés de maladie de Lyme*

Pour atteindre les objectifs souhaités, une demande de données a été effectuée envers l'INSPQ afin d'obtenir les cas déclarés de maladie de Lyme entre le 1<sup>er</sup> janvier 2004 et le 31 décembre 2018 recueillis dans le registre des MADO du MSSS. En vertu du Règlement ministériel d'application de la Loi sur la santé publique, les renseignements à fournir aux autorités de santé publique pour la maladie de Lyme doivent être (Éditeur officiel du Québec, 1<sup>er</sup> avril 2019) :

1. Le nom de la maladie;
2. Le nom, le sexe, l'occupation, la date de naissance, l'adresse incluant le code postal, le numéro de téléphone et le numéro d'assurance maladie de la personne atteinte;
3. La date du début de la maladie;
4. Les prélèvements pour analyse en laboratoire, la date de ces prélèvements et le nom des laboratoires qui procéderont aux analyses;
5. Le nom du médecin, son numéro de permis d'exercice et les numéros de téléphone où il peut être rejoint;
6. Les informations sur les dons de sang, d'organes ou de tissus faits par la personne atteinte et les informations sur le sang, les produits sanguins, les organes ou les tissus reçus par la personne atteinte.

Après réception des données, les autorités de santé publique entreprennent une enquête épidémiologique pour recueillir les lieux probables d'exposition, soit les municipalités (MSSS, 2019). La Direction générale de la santé publique du MSSS décrit les définitions nosologiques des cas de maladie de Lyme comme suit (MSSS, 2018) :

### Cas confirmé

Manifestations cliniques compatibles et présence d'une des trois conditions suivantes :

1. Isolement de *Borrelia burgdorferi* sensu lato dans un échantillon clinique approprié; ou
2. Détection d'acides nucléiques de *Borrelia burgdorferi* sensu lato; ou
3. Détection d'IgM ou d'IgG dirigées contre *Borrelia burgdorferi* sensu lato dans le sérum d'une personne ayant eu une exposition significative dans une zone endémique ou résidante dans une zone endémique pour la maladie de Lyme.

### Cas probable

Présence d'une des deux situations suivantes :

1. Manifestations cliniques compatibles en l'absence d'exposition significative ou de résidence dans une zone endémique pour la maladie de Lyme, et détection d'IgM ou d'IgG dirigées contre *Borrelia burgdorferi* sensu lato dans le sérum; ou
2. Érythème migrant observé par un médecin chez une personne ayant eu une exposition significative dans une zone endémique pour la maladie de Lyme.

Les variables nécessaires pour nos analyses sont, pour chaque cas confirmé ou probable, la date de déclaration et du début des symptômes, la municipalité d'acquisition, ainsi que certaines données sociodémographiques tels le sexe et l'âge pour des analyses descriptives de base. La base de données reçue fut vérifiée et validée par l'INSPQ en s'appuyant sur les définitions nosologiques susmentionnées (Adam-Poupart et al., 2016).

### *Population par municipalité*

Les données de population par municipalité entre 2001 et 2018 ont été téléchargées à partir du site web de l'Institut de la statistique du Québec (Statistique Québec, 2019).

### *Fichiers SIG*

Les fichiers « shapefiles » des municipalités du Québec (N=1285) ont été téléchargés du site web de Statistique Canada (Statistique Canada, 2019). Les centroïdes de chaque municipalité, c'est-à-dire les coordonnées qui correspondent aux centres géographiques, ont été assignés avec le système d'information géographique à source ouverte QGIS 3.4.2.

Toutes les bases de données ont été nettoyées et organisées avec les logiciels Microsoft Excel et R 3.5.2.

### **Analyse de surface de tendance**

Une analyse de surface de tendance a été effectuée pour estimer la vitesse frontale de l'émergence de la maladie de Lyme au Québec. Le paquet R « outbreak velocity » peut servir à calculer cette tendance spatiotemporelle sur une surface continue (Morrison, 2016). Les variables utilisées sont le temps en semaine entre le premier cas jamais déclaré et chaque premier cas par municipalités, ainsi que les coordonnées en mètres de chaque municipalité. L'analyse sera effectuée en deux catégories pour trois définitions de municipalité à risque (Tableau 1). La première catégorie (A) n'utilise que la date de début des symptômes des cas. La deuxième catégorie (B) n'utilise que la date de déclaration, c'est-à-dire la date lorsqu'un professionnel de la santé déclare un patient atteint de la maladie de Lyme au registre des MADO. L'analyse en deux catégories sert à examiner la précision des résultats. La première définition de municipalités à risque est tout simplement d'utiliser tous les premiers cas pour chaque municipalité dans l'entièreté de la période d'étude de 2004 à 2018. Les deux dernières définitions serviront d'analyses de sensibilité. La deuxième définition est de seulement utiliser les municipalités avec deux cas ou plus déclarés dans les cinq dernières années, et celle-ci est tirée de la définition de l'INSPQ des régions à risque de maladie de Lyme (INSPQ,

2019b). La troisième définition est une combinaison des deux premières, qui n'est que d'utiliser les municipalités avec deux cas déclarés ou plus pendant toute la période d'étude.

Tableau 1. Identification des définitions de cas de maladie de Lyme par catégories

Définitions	Catégories	
	-A- Date de début des symptômes	-B- Date de déclaration
-1- Premiers cas de chaque municipalité entre 2006-2018	A1	B1
-2- Municipalités avec au moins deux cas entre 2013-2018	A2	B2
-3- Municipalités avec au moins deux cas entre 2006-2018	A3	B3

La vitesse de l'émergence est calculée en estimant des modèles de régression polynomiale entre le temps et les coordonnées X et Y sur une surface continue (Zinszer, Morrison, Anema, Majumder et Brownstein, 2015; Zinszer et al., 2017). Cette surface continue est premièrement estimée par moindres carrés dans un modèle linéaire en deux dimensions (Zinszer et al., 2015; Zinszer et al., 2017). Si ce modèle ne capture pas fidèlement la modulation de la tendance, un polynôme du prochain ordre se rajoute jusqu'à ce qu'elle représente la tendance d'émergence locale (Zinszer et al., 2015; Zinszer et al., 2017). Six modèles ont été estimés, chacun d'un ordre croissant, où chaque ordre supérieur à 1 avait une interaction entre X et Y. Le meilleur modèle a été choisi en choisissant la valeur la plus basse de l'AIC et du BIC, et le troisième ordre a été sélectionné pour l'estimation, représentée par la formule suivante:

$$f(t|x, y) = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 X^2 + \beta_4 Y^2 + \beta_5 X^3 + \beta_6 Y^3 + \beta_7 XY + \varepsilon$$

où  $E(\varepsilon) = 0$ ;  $x = 1$ ;  $y = 1$

Les dérivées partielles de ce modèle en termes de X et Y produisent des paramètres vectoriels pour chaque coordonnée, qui sont subséquentment convertis en vitesse et direction, où la vitesse  $\|xy\| =$

$\sqrt{(x^2 + y^2)}$  en mètres par semaine et la direction  $\theta = \tan^{-1}(y/x)$  (Zinszer et al., 2015; Zinszer et al., 2017). Ces paramètres ont été géocodés sur les centroïdes des municipalités avec QGIS 3.4.2 afin de cartographier l'émergence de la maladie de Lyme au Québec.

### **Analyse d'agrégats**

Le logiciel SaTScan a été utilisé pour détecter les agrégats spatiotemporels de cas de maladie de Lyme au Québec avec une statistique « scan » pour toutes les municipalités ayant déclaré des cas pendant la période d'étude. Ce type de statistique est employé pour détecter les agrégats de cas de maladie dans un contexte purement spatial, temporel, ou spatiotemporel, en scannant une fenêtre circulaire avec un radius variant entre zéro kilomètre à l'infini à travers le temps ou l'espace afin de détecter le nombre de cas observés et attendus par région (Kulldorff, 2018). Plus précisément, les agrégats identifiés regroupent un nombre de cas observés significativement plus élevés que le nombre de cas attendus dans une optique spatiale ou temporelle (Kulldorff, 2018). Le nombre attendu de cas est calculé selon la moyenne des cas observés dans la population totale de l'étude pondérée sur la superficie géographique de cette population. Différents modèles de probabilités peuvent être utilisés dans une statistique « scan » selon le type de données que l'on analyse. Un modèle discret de Poisson est utilisé puisque les données analysées sont des décomptes par municipalité par an. Une analyse spatiotemporelle est soutenue par une deuxième purement spatiale. Ces analyses sont effectuées pour les cas selon la date de déclaration et la date de début des symptômes.

Les variables utilisées pour l'analyse d'agrégats sont le nombre total de cas par municipalité par année, la population moyenne par municipalité pour la période d'étude, et les centroïdes de chaque municipalité. Le temps en année est choisi puisque la maladie de Lyme est généralement

saisonnaire et son incidence est basse. La taille des agrégats est spécifiée comme étant au plus 15% de la population québécoise à risque dans des cercles avec un radius d'un maximum de 25 km. Cette restriction a été choisie, car la maladie de Lyme est rare au Québec, et le paramètre par défaut de 50% de la population à risque produit parfois des agrégats trop larges qui peuvent chevaucher des régions non endémiques (Lantos et al., 2015). Un nombre de municipalités à risque où des cas sont déclarés est identifié pour chaque agrégat, dont la population à risque est la population totale de ces municipalités. Un risque relatif (RR) y est estimé, c'est-à-dire le risque à l'intérieur des agrégats relatif au risque à l'extérieur des agrégats. Ces agrégats sont cartographiés sur QGIS 3.4.2 de manière à représenter les régions à risque selon une optique temporelle.

## **Résultats**

### **Épidémiologie descriptive**

Après gestion des données de surveillance, 727 cas dans 138 municipalités ont été sélectionnés pour la période de 2006 à 2018, incluant 693 cas avec date confirmée du début des symptômes dans un total de 128 municipalités. Les cas déclarés entre 2004 et 2005 furent acquis à l'extérieur du Québec. Il y a 34 données manquantes pour les dates de début de symptômes. Les cas sont fréquemment déclarés plusieurs semaines, même des années après l'apparition des premiers symptômes. Le décalage moyen entre l'apparition des symptômes et la consultation médicale est de deux mois, allant de la journée même à plus de 10 ans. Pour simplifier la synthèse, chaque paramètre décrit sera pour tous les cas déclarés, avec ceux pour laquelle la date de début des symptômes est connue entre parenthèses.

Près de 71% (75%) des cas se retrouvent dans les régions sociosanitaires de la Montérégie et de l'Estrie. La municipalité avec le plus de cas est celle de Bromont en Estrie, avec 138 (133) cas

déclarés, alors que 71% (88%) des municipalités touchées ont moins que 10 cas (Figures 1 et 2). Le nombre de cas déclarés entre 2006 et 2012 était faible, entre 1 et 13, alors qu'il a augmenté de manière importante en 2013 avec 72 nouveaux cas. Cette tendance abrupte s'est maintenue jusqu'en 2017, année au cours de laquelle 212 cas ont été recensés, plus que le double du nombre de 2016. Le nombre de nouveaux cas baisse à 141 en 2018 (Figure 3). Les municipalités touchées recensent cinq cas en moyenne, et le nombre moyen de déclarations par année pour la période d'étude est 56. Les hommes représentent 57% du total des cas, et un test de chi carré démontre qu'ils sont significativement plus à risque que les femmes, alors que la fréquence de déclaration est plus importante chez les personnes âgées de 50 à 69 ans (Figure 4).

Figure 1. Nombre de cas cumulés de maladie de Lyme au Québec par année de déclaration, 2006 – 2018 (N = 727)

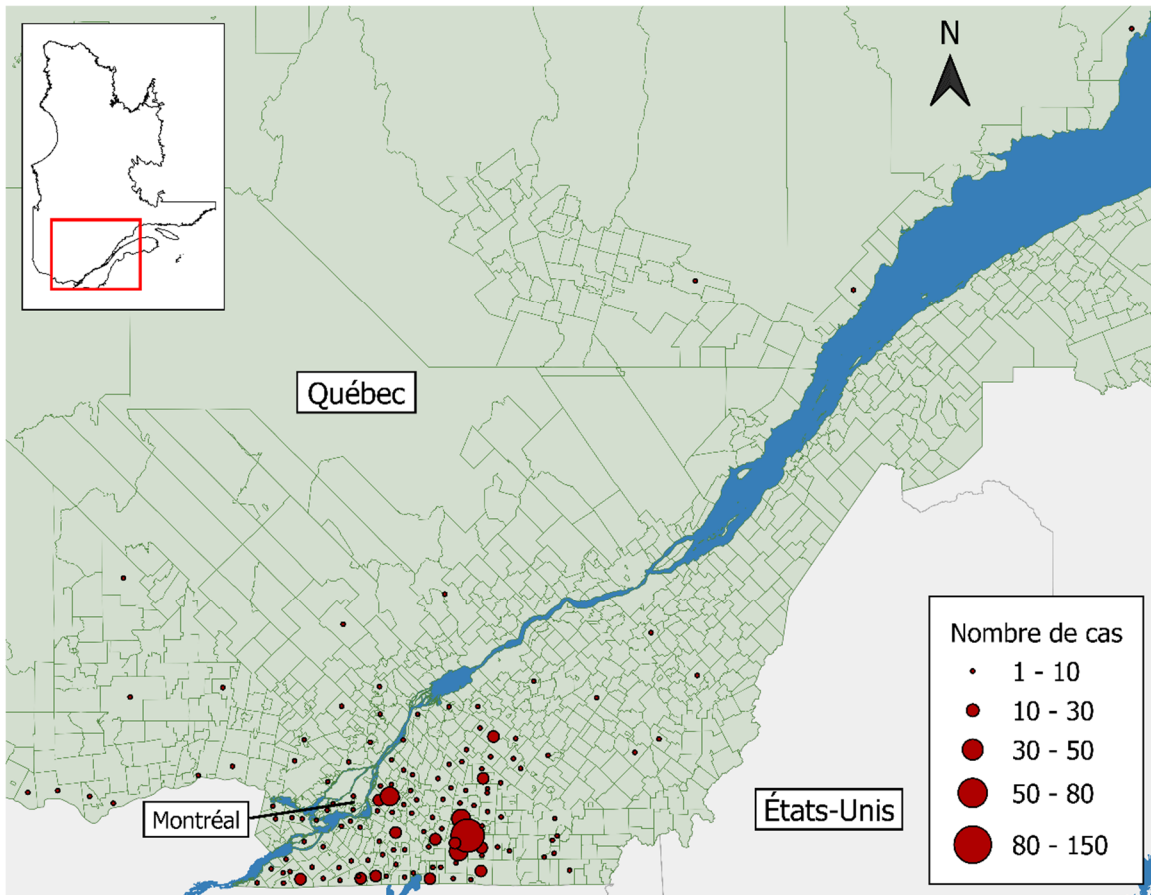




Figure 2. Nombre de cas cumulés de maladie de Lyme au Québec par année de début des symptômes, 2006 – 2018 (N = 693)

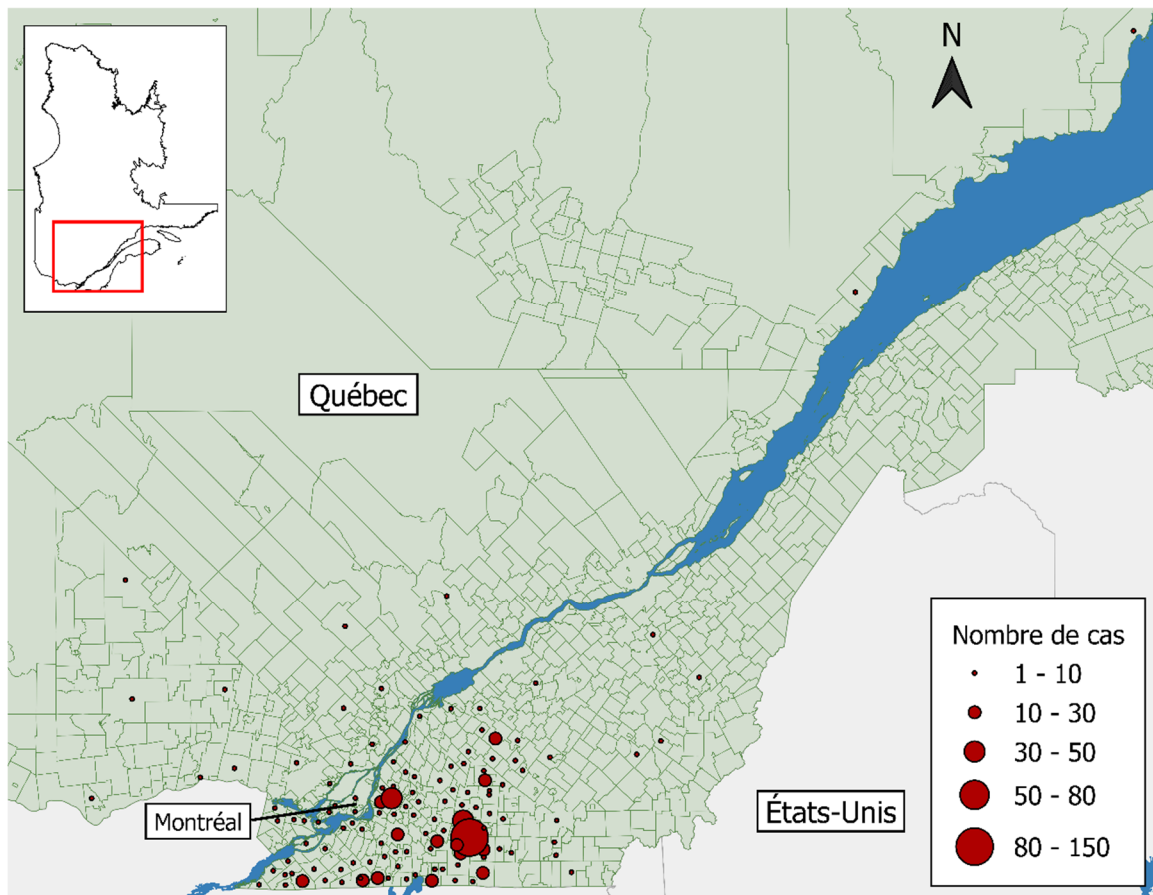


Figure 3. Nombre de cas de maladie de Lyme au Québec selon l'année du début des symptômes, 2006 – 2018 (N = 693)

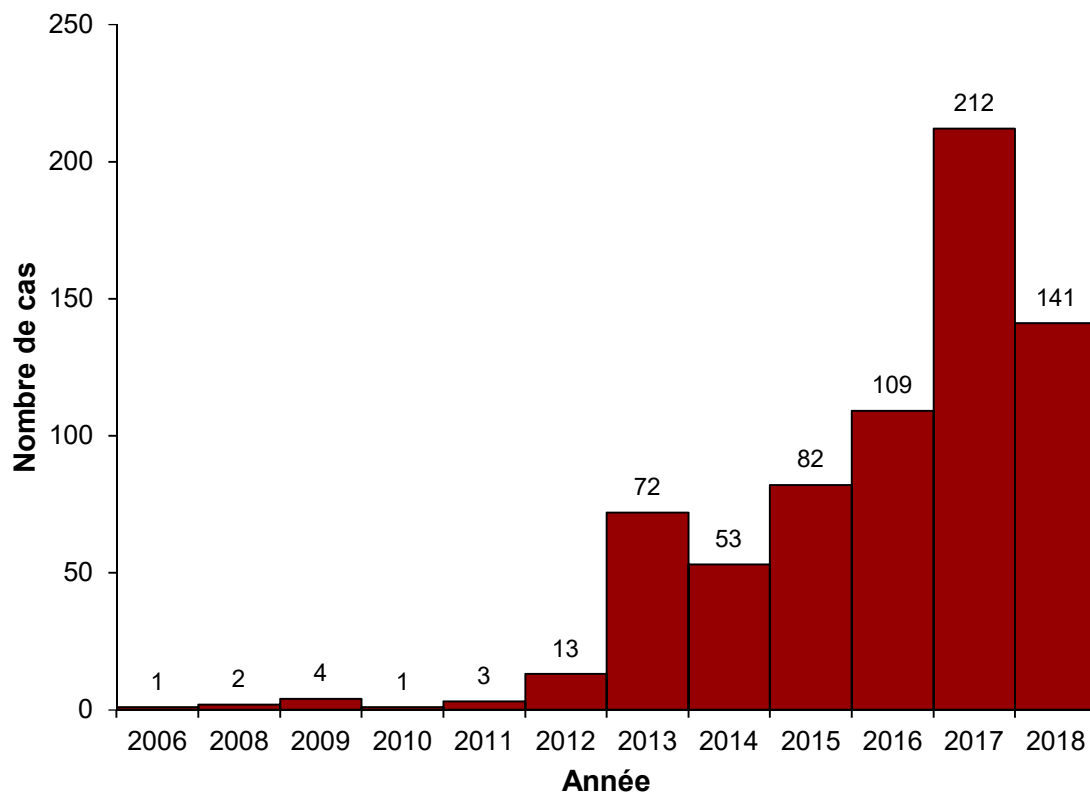
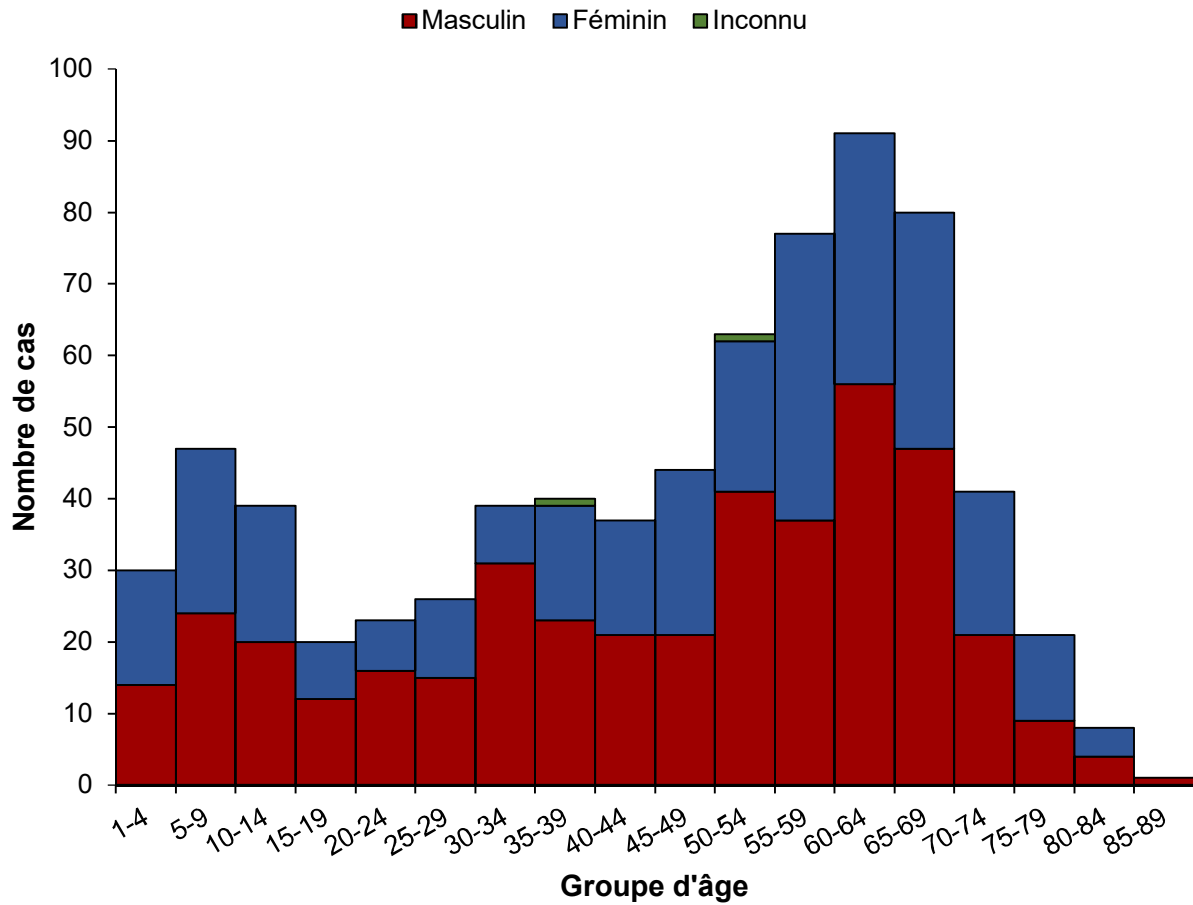


Figure 4. Nombre de cas de maladie de Lyme déclaré au Québec par date de déclaration, distribué par sexe et groupe d'âge, 2006 – 2018 (N = 727)



## **Analyse de surface de tendance**

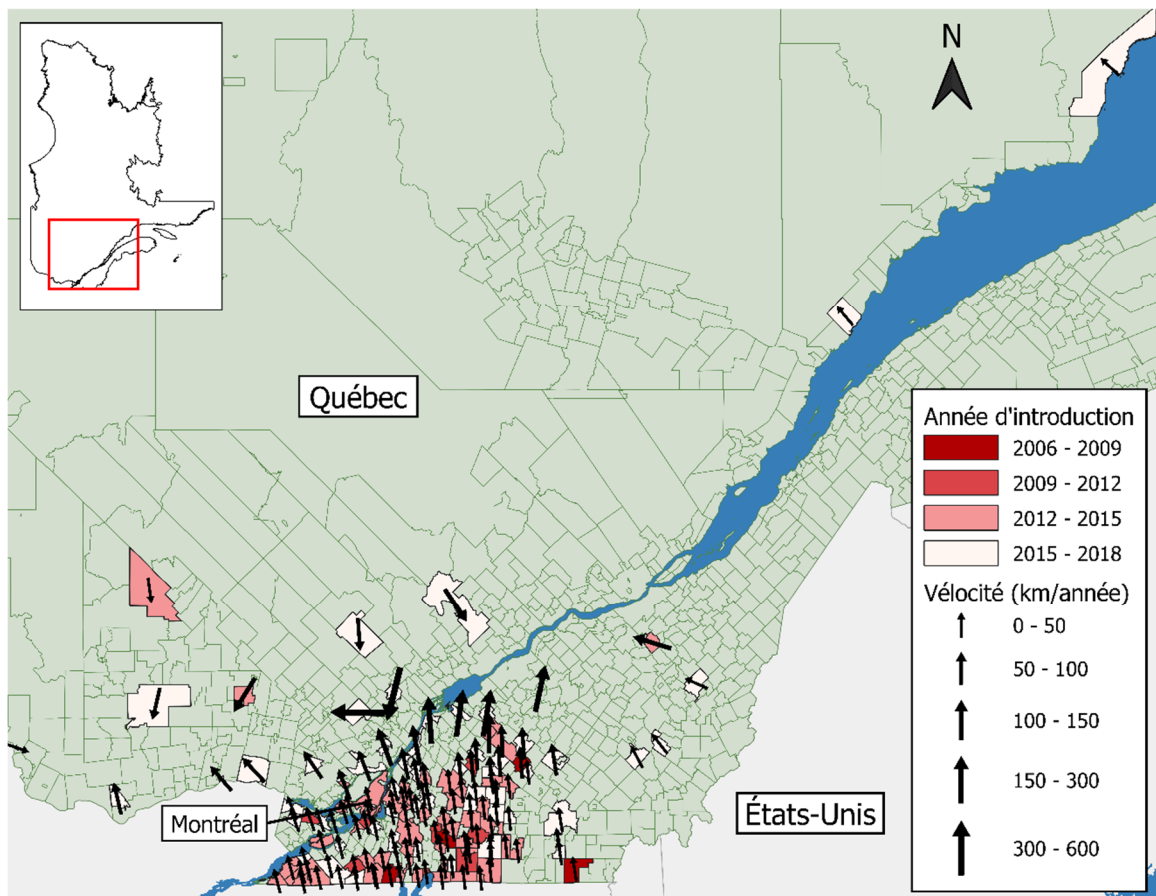
Pour les trois définitions des deux catégories, l'analyse de surface de tendance de polynôme du troisième degré a produit les meilleures estimations, qui sert à expliquer le niveau de modulation de l'introduction de maladie sur une surface continue. Les analyses pour lesquelles toutes les municipalités ont été incluses selon les dates de début de symptômes et de déclaration seront les seules définitions discutées dans le contexte de ce mémoire. L'Annexe D inclut des informations détaillées sur les quatre définitions (A2, A3, B2, B3) qui ne seront pas discutées dans le texte principal.

Définition A1 : Premiers cas déclarés de toutes les municipalités selon la date de début des symptômes.

La vitesse moyenne de propagation de la maladie de Lyme au Québec estimée par municipalité, en utilisant les premiers cas déclarés de toutes les 128 municipalités, est de 53 km/année, avec une vitesse nette de 34 km/année à 109° vers le nord-ouest (Figure 5). La vitesse d'émergence nette à 90° vers le nord est de 32 km/année. La moyenne représente la vitesse par municipalité sans considérer leurs directions, alors que la vitesse nette représente la tendance générale de l'émergence de la maladie de Lyme en prenant compte de la direction où elle se propage. Dans le contexte de cette étude, la vitesse nette vers le nord est aussi calculée. À titre de référence, 0° représente l'est et 90° le nord. Nous retrouvons 96 municipalités (75%) qui ont subi des introductions inférieures à 50 km/année, et se retrouvent au sud-ouest du Québec, à la frontière des États-Unis, jusqu'au niveau de Montréal et de la Rive-Sud. Il y a 20 municipalités (16%) avec des introductions variantes entre 50 et 100 km/année, et sont distribuées aux Laurentides, en Montérégie, à Lanaudière, et au Centre-du-Québec. Les douze municipalités (9%) avec des vitesses variantes entre 100 et 600 km/année sont réparties plus profondément dans le territoire du Québec,

au nord de la latitude délimitée par l'arrondissement de Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, à l'est de Montréal.

Figure 5. Vitesse d'émergence de la maladie de Lyme au Québec pour 128 municipalités, par date de début des symptômes (2006 – 2018).

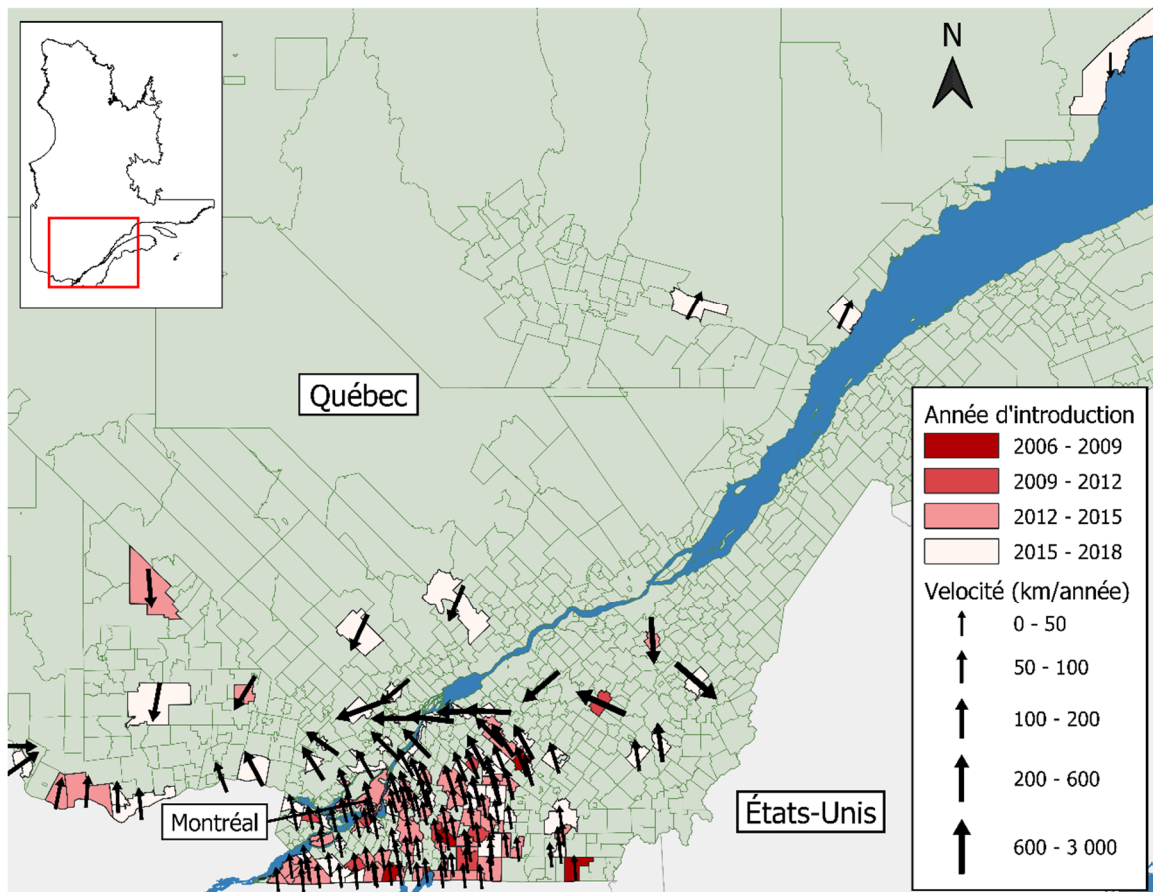


Définition B1 : Premiers cas déclarés de toutes les municipalités selon la date de déclaration.

La vitesse moyenne d'apparition des cas par municipalité selon la date de déclaration est de 91 km/année, avec un minimum de 14.5 km/année et un maximum de 2 949 km/année. La vitesse

nette est de 17 km/année à 69° vers le nord-nord-est, et 16 km/année vers le nord (Figure 6). La maladie de Lyme est apparue dans 81 municipalités (59%) à une vitesse entre 0 et 50 km/année, dans les régions de la Montérégie et de l’Estrie. Elle émerge à des vitesses comprises entre 50 et 100 km/année dans 30 municipalités (22%), surtout au nord de la Montérégie et dans l’Outaouais, et entre 100 et 200 km/année dans 18 municipalités (13%) dans plusieurs régions au nord de Montréal. Nous trouvons 8 municipalités qui ont subi des vitesses élevées d’émergence entre 200 et 600 km/année, alors que le modèle indique des vitesses extrêmes de 2 950 km/année dans la municipalité de Beauceville, en Chaudière-Appalaches.

Figure 6. Vitesse d’émergence de la maladie de Lyme au Québec pour 138 municipalités, par date de déclaration (2006 – 2018).



## **Analyse d'agrégats**

Des analyses spatiotemporelles et purement spatiales ont été réalisées pour chaque définition de cas. Seulement les agrégats spatiotemporels seront discutés, car les agrégats purement spatiaux ne permettent pas d'interpréter les risques de la maladie de Lyme d'une manière aussi approfondie puisqu'ils n'incluent pas l'aspect temporel. Ceux-ci ont été effectués pour vérifier la sensibilité de nos analyses. L'Annexe E fournit un sommaire des résultats des agrégats spatiaux.

L'analyse spatiotemporelle a premièrement été effectuée pour les deux définitions de cas pour toutes les municipalités ayant déclaré des cas. Un total de dix agrégats ont été détectés pour les cas selon la date de début des symptômes, alors que douze ont été détectés pour les cas selon la date de déclaration. Pour chaque définition, sept agrégats ont été retenus avec un seuil de signification inférieur à 0.05 (Figures 7 et 8). Les agrégats se retrouvent au sud-ouest du Québec, dans les régions de la Montérégie, de l'Estrie et du Centre-du-Québec. Les agrégats entre les deux définitions se retrouvent aux mêmes endroits et leurs tailles ne sont pas différentes l'une à l'autre. L'agrégat 1 pour les deux définitions est celui avec le plus haut nombre de cas et le RR le plus élevé. Nous y retrouvons, entre 2013 et 2018, 269 cas avec un RR de 89.27 selon la date de début des symptômes, et 282 cas et un RR de 97.80 pour la date de déclaration. Le nombre de cas et les RR diminuent pour les agrégats subséquents de manière assez considérable.

Figure 7. Agrégats spatiotemporels de cas de maladie de Lyme au Québec entre 2006 et 2018 selon la date de début des symptômes.

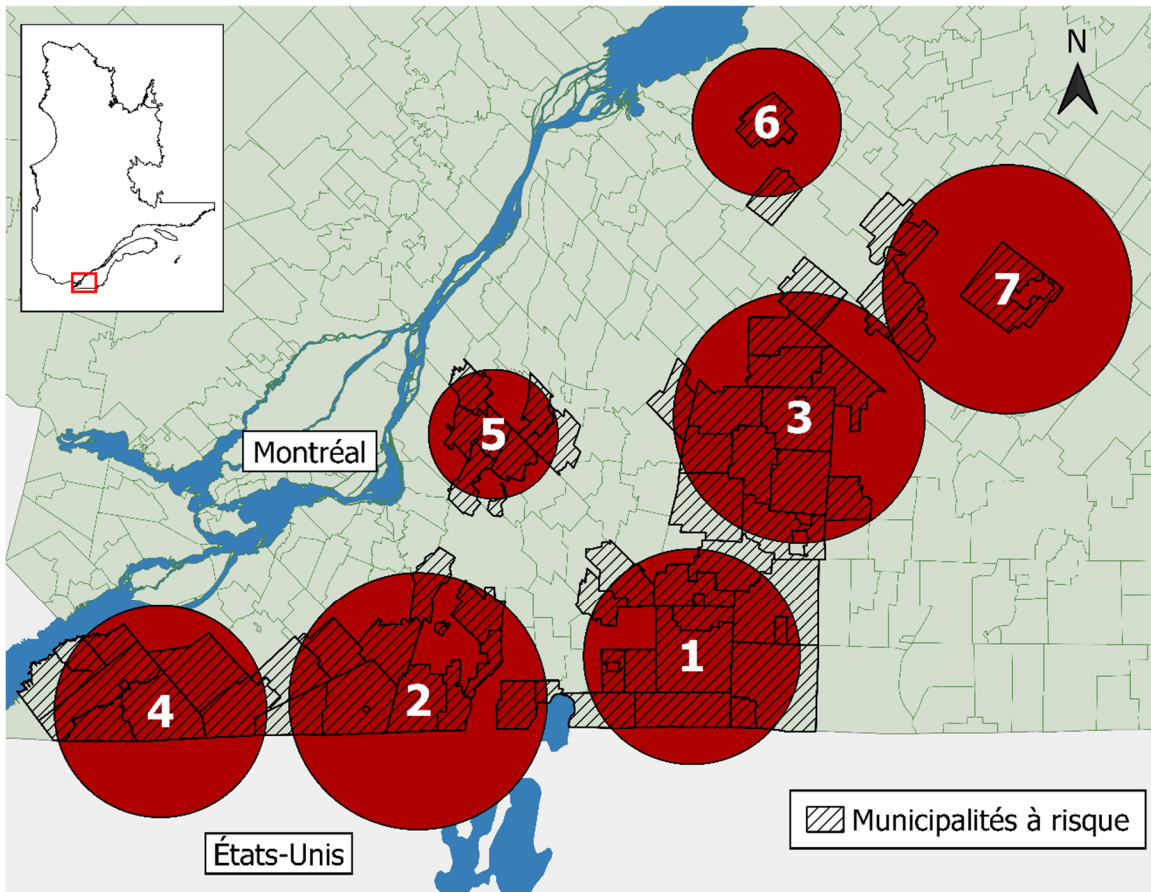




Tableau 2. Variables des agrégats spatiotemporels de la Figure 7

	Agrégats						
	1	2	3	4	5	6	7
Radius (km)	20.80	24.81	23.97	20.41	12.33	14.05	23.67
Période (années)	2013-2018	2013-2018	2015-2018	2013-2018	2016-2018	2015-2018	2015-2018
Nb de municipalités à risque	15	14	14	8	7	2	4
Population à risque (Nb de personnes)	52 676	26 424	100 670	15 644	109 440	2 074	7 239
Nb de cas déclarés	269	73	85	40	46	5	6
Nb de cas attendus	4.89	2.45	6.23	1.45	5.08	0.13	0.45
Incidence/100 000 personnes	85.1	46.0	21.1	42.6	14.0	60.3	20.7
Risque relatif	89.27	33.13	15.41	29.17	9.62	49.22	13.50
Valeur $p$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.01	<0.01	0.0016	0.032

Figure 8. Agrégats spatiotemporels de cas de maladie de Lyme au Québec entre 2006 et 2018 selon la date de déclaration.

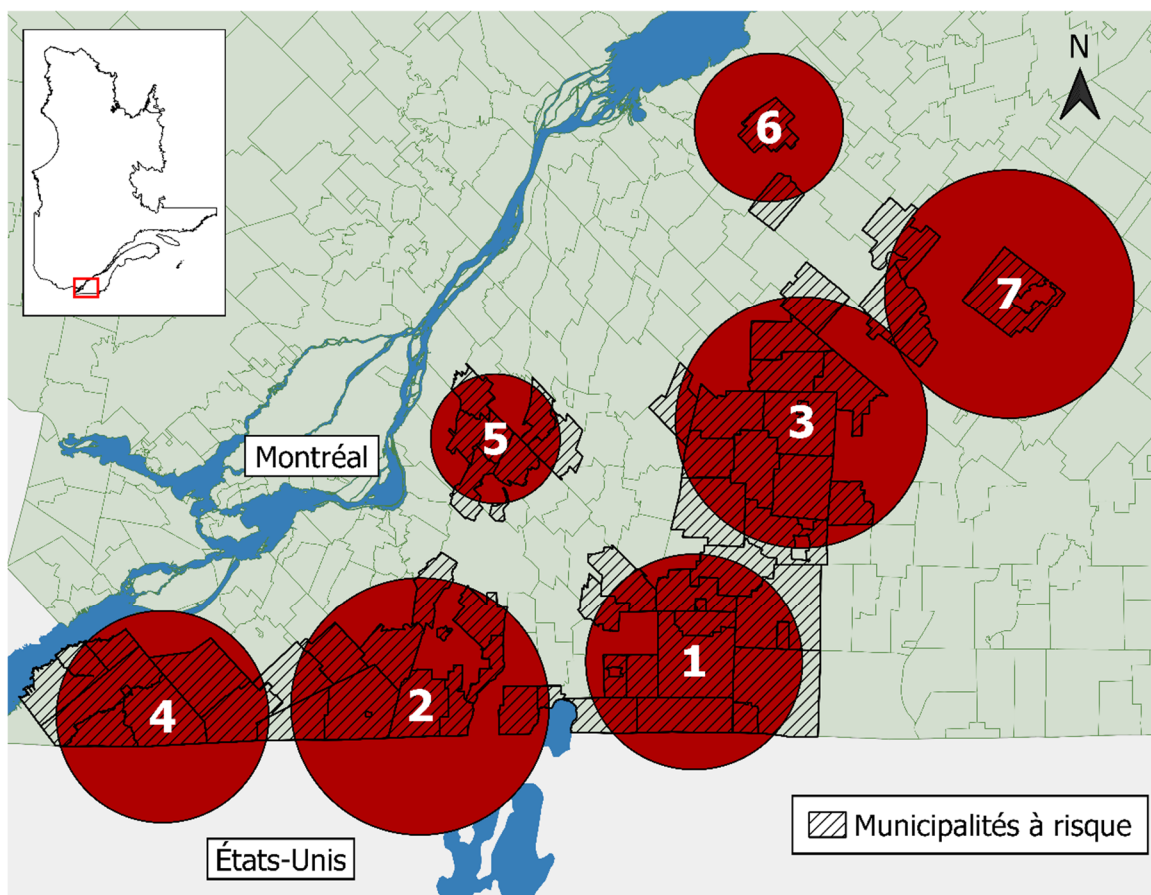


Tableau 3. Variables des agrégats spatiotemporels de la Figure 8

	Agrégats						
	1	2	3	4	5	6	7
Radius (km)	20.80	24.81	23.97	20.41	12.33	14.05	23.67
Période (Années)	2013-2018	2013-2018	2015-2018	2013-2018	2016-2018	2015-2018	2015-2018
Nb de municipalités à risque	15	14	14	8	7	2	4
Population à risque (Nb de personnes)	52675	26423	100670	15645	109448	2074	7239
Nb de cas déclarés	282	75	88	40	48	5	6
Nb de cas attendus	4.68	2.35	5.96	1.39	4.86	0.12	0.43
Incidence/100 000 personnes	89.2	47.3	21.9	42.6	14.6	60.3	20.7
Risque relatif	97.80	35.51	16.65	30.39	10.49	40.96	14.10
Valeur $p$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.01	<0.01	0.0013	0.022

## Discussion

Cette étude a estimé que la maladie de Lyme se déplace vers le nord à une vitesse variante entre 16 et 32 km/année, selon la définition de cas utilisée. La maladie est majoritairement retrouvée dans les régions sociosanitaires de la Montérégie et de l'Estrie, où les conditions environnementales favorisent la survie d'*I. scapularis* et le développement de l'agriculture et de la foresterie ainsi que la popularité croissante des activités de plein air qui augmentent les risques d'exposition (Camping Québec, 2018; Clow et al., 2017; Eisen et al., 2016; NIOSH, 2017). Ce n'est qu'après 2013 que nous observons une augmentation notable du nombre de cas déclarés, avec un maximum de 212 cas déclarés en 2017.

Nous observons une courbe bimodale de cas dans les groupes d'âges de 5 à 14 ans et de 50 à 69 ans, ce dernier représentant d'ailleurs le groupe le plus à risque. Les hommes sont aussi statistiquement plus à risque que les femmes, surtout chez les 15 à 34 ans. Cette tendance démographique est similaire aux États-Unis, où les 5 à 14 ans sont les plus à risque, mais la tranche d'âge de personnes à risque plus âgées est beaucoup plus large, allant de 35 à 60 ans (Steere et al., 2016). En Europe, ce sont les femmes qui sont généralement plus à risque, mais la distribution des cas déclarés est toujours bimodale chez les enfants et les personnes plus âgées (Sajanti et al., 2017; Steere et al., 2016). Le secteur primaire d'activité économique au Québec, incluant l'agriculture et la foresterie, a employé en 2017 2.6 fois plus d'hommes que de femmes, ce qui pourrait expliquer cette observation relativement au risque plus élevé chez les hommes que chez les femmes (CIRANO, 2018b; Institut de la statistique du Québec, 2018). Une étude sur le taux de participation aux activités de plein air des Québécois en 2017 démontre que 41% des hommes et 35% des femmes participent régulièrement à des activités extérieures (Chaire de tourisme Transat ESG UQAM, 2017).

Il est possible que les enfants moins de 15 ans soient plus à risque en raison de leur comportement enjoué qui peut augmenter les chances d'être exposés aux risques de maladie de Lyme (Gasmi, Ogden, Leighton, Lindsay et Thivierge, 2016; Rand et al., 2007). À titre purement spéculatif, les risques peuvent être accrus lorsque les vacances d'été débutent et que les enfants sont en pleine jouissance, alors qu'il est d'ailleurs possible que ce groupe d'âge ne saisisse pas entièrement la réalité des risques que posent les tiques. Chez les personnes âgées de 50 à 69 ans, malgré un faible taux de participation à des activités de plein air en général, ce groupe d'âge participe tout de même de manière régulière à la randonnée pédestre et au vélo de montagne, et représente plus de 13% des Québécois employés au secteur primaire (Chaire de tourisme Transat ESG UQAM, 2017; CIRANO, 2018a). Avec un manque d'accès ou un faible intérêt à l'utilisation de l'internet chez ce groupe d'âge (Bernier, 2017), on peut émettre l'hypothèse que les 50 à 69 ans sont moins sensibilisés à la maladie de Lyme alors qu'ils approchent l'âge de la retraite, couramment associé au temps libre et aux activités récréatives, mais cette question n'est pas explorée dans la littérature.

La moitié de la population québécoise est uniquement francophone, ce qui peut possiblement limiter l'exposition aux campagnes anglophones de sensibilisation provenant des États-Unis, où la maladie de Lyme est mieux connue (Aenishaenslin et al., 2016; Statistique Canada, 2017). Malgré une population canadienne de plus en plus sensible à la maladie de Lyme, et bien qu'elle soit l'une des provinces avec le taux d'incidence le plus élevée au pays, le Québec a tout de même connu un faible niveau de sensibilisation relatif aux autres régions ciblées suite à une campagne lancée en 2014 (Aenishaenslin et al., 2016). Alors que 33% des répondants québécois affirment n'avoir jamais entendu parler de la maladie de Lyme même après la campagne, cette étude souligne d'ailleurs que les changements dans les niveaux de sensibilisation étaient plus marqués dans les régions où la maladie de Lyme ne présentait pas un risque élevé (Aenishaenslin et al., 2016). Il est donc probable qu'une connaissance plus marquée de la maladie de Lyme dans ces régions à

faible risque a favorisé l'adoption de comportements préventifs lorsque les risques devenaient plus importants (Aenishaenslin et al., 2016). En effet, l'augmentation du nombre de campagnes de communication des risques mieux ciblés dans les dernières années a sollicité la recherche d'information dans plusieurs centaines de municipalités québécoises, afin de mieux connaître leurs niveaux de risque, de prévenir l'exposition à la maladie de Lyme, et d'être informé sur les impacts sur la santé (Jacob et al., 2019). Cependant, les pratiques cliniques des médecins du Québec visant le diagnostic de la maladie de Lyme ne reflètent pas une connaissance adéquate de la maladie, soulignant davantage l'importance des campagnes ciblées aux professionnels de la santé (Ferrouillet, Milord, Lambert, Vibien et Ravel, 2015; Gasmi et al., 2017). En l'absence d'études évaluatives à jour de l'évolution du niveau de connaissance de la maladie de Lyme au Québec depuis 2014, il est impossible de déterminer à quel degré la population québécoise est mieux sensibilisée, quoiqu'il soit justifiable d'assumer qu'il soit sous-représenté.

Nos travaux démontrent que la maladie de Lyme poursuit bel et bien son émergence vers le nord et que plusieurs agrégats significatifs à taux élevés se retrouvent au sud-ouest de la province. L'introduction nordique perçue de la maladie varie selon la définition de cas que l'on utilise, soit selon la date de début des symptômes au registre des MADO ou la date de déclaration. La première indique qu'elle émerge à une vitesse 32 km/année vers le nord, et la dernière nous montre qu'elle émerge à 16 km/année vers le nord. De plus, nos analyses d'agrégats de cas de maladie de Lyme à taux élevés délimitent les régions particulièrement à risque d'acquisition. Les plus importants se trouvent dans les régions sociosanitaires de la Montérégie et de l'Estrie, alors que l'agrégat le plus à risque regroupe la municipalité de Bromont et ses environs. Ces découvertes sont importantes, car cette étude est la première de son genre à avoir calculé la vitesse et la direction d'émergence des cas

de maladie de Lyme au Québec ainsi que d'avoir modélisé des agrégats avec un risque relatif pour les régions où elle est endémique.

La maladie de Lyme est visiblement en émergence au Québec et sa propagation se fait vers le nord depuis la dernière décennie. Les observations tirées de cette étude soulignent une importante distinction à faire lors de l'interprétation des deux différentes définitions de cas utilisées dans les analyses de surface de tendance. La vitesse moyenne par municipalité est 53 km/année selon la date du début des symptômes, avec une vitesse nette de 34 km/année à 109° vers le nord-ouest. La vitesse moyenne par municipalité selon la date de déclaration est 91 km/année, avec une vitesse nette de 17 km/année à 69° vers le nord-est. La vitesse moyenne élevée des dates de déclaration peut largement être influencée par la vitesse d'émergence extrême de 2 950 km/année dans la municipalité de Beauceville, en Chaudière-Appalaches. La moyenne indique la vitesse par municipalité alors que la vitesse nette indique la tendance générale de l'émergence vers une direction, mais l'objectif premier est de déterminer la vitesse de propagation vers le nord dans le contexte de cette étude. Les vitesses nettes à 90° vers le nord est 32 km/année et 16 km/année selon la date du début des symptômes et de déclaration, respectivement.

En latitude plus élevée dans la province, il est possible d'envisager que la maladie de Lyme puisse éventuellement se propager vers le sud du Québec lorsque nous prenons en compte que plusieurs municipalités exemptes de la maladie bordent celles qui ont connu des vitesses d'émergence élevées dans un certain « effet de lisière », particulièrement lorsque ces dernières sont isolées. Les conclusions tirées de Simon et al (2014) sur la vitesse d'émergence de *B. burgdorferi* responsable de la maladie de Lyme démontrent que l'agent se propage vers le nord à une vitesse entre 3.5 et 11 km/année au Québec, alors que la souris à pattes blanches s'introduit à 10 km/année dans la province (Roy-Dufresne et al., 2013). La propagation de *B. burgdorferi* et de la souris à pattes blanches est notamment due aux changements climatiques favorisant la dispersion des tiques vers

le nord du Québec, ce qui peut expliquer l'apparition de cas dans ces régions (Roy-Dufresne et al., 2013; Simon et al., 2014). La possibilité demeure que les municipalités d'expositions des cas déclarés dans les régions sociosanitaires du nord soient erronées puisqu'elles ne sont pas endémiques pour la maladie (INSPQ, 2018), et qu'il est raisonnable de croire que ces cas ont pu être exposés au sud-ouest de la province lors d'un voyage. Cependant, ces études sont les seules au Québec à avoir estimé les vitesses d'émergence de la maladie de Lyme et de ses réservoirs, de sorte que nos résultats ne sont pas cohérents. Vraisemblablement, si *B. burgdorferi* et *P. leucopus* se propagent les deux vers le nord à une vitesse aux alentours de 10 km/année, nous devrions nous attendre que les cas de Lyme se propagent à une vitesse similaire, ce qui est contraire aux estimations de notre étude. Cette inconsistance peut cependant être expliquée par la notion que les cas humains de Lyme ne peuvent tout de même apparaître avant que les réservoirs et le pathogène s'établissent dans une région. La transmission de *B. burgdorferi* chez l'humain peut donc se faire à une vitesse différente que chez les réservoirs, particulièrement lorsque la maladie devient émergente dans une région auparavant saine (Ogden, Lindsay, et al., 2013). Nous pouvons cependant être de l'avis qu'il est possible que la vitesse et la direction d'émergence des éléments écologiques de la maladie de Lyme ne soient fidèlement représentées compte tenu du nombre limité d'études sur ce sujet en général.

La différence entre les vitesses d'émergence des cas de Lyme selon les dates utilisées peut s'expliquer par ses caractéristiques pathogéniques. La période d'incubation de la maladie de Lyme se situe entre 3 et 32 jours et les premiers symptômes peuvent souvent passer inaperçus (Heymann, 2004). Les symptômes plus sévères peuvent survenir jusqu'à plusieurs mois après l'exposition à une tique infectée. Il est donc entièrement possible qu'un patient atteint ne consulte un médecin que dans les mois, voire les années suivant son exposition. Ce décalage dans le temps entre la date de début des symptômes et la date de déclaration, distinctement variable pour chaque cas, a comme effet de sous-estimer la vitesse de propagation de la maladie de Lyme. Malgré les deux définitions de cas



pouvant générer différentes interprétations de l'émergence de la maladie de Lyme, celles-ci démontrent tout de même que la maladie de Lyme se propage relativement rapidement vers le nord. La vitesse et la direction d'émergence nous indiquent que nous pouvons nous attendre qu'elle émergera dans plusieurs municipalités plus au nord dans les régions sociosanitaires de l'Outaouais, des Laurentides et de la Mauricie.

Les agrégats spatiotemporels d'une maladie, comparativement aux agrégats purement spatiaux, nous permettent non seulement de mieux localiser, mais aussi de situer dans le temps quand ces régions sont devenues à risque, ce qui rajoute une dimension de plus à notre compréhension des patrons de cette maladie. Sept agrégats spatiotemporels de cas de maladie de Lyme ont été identifiés entre 2013 et 2018 au sud-ouest de la province à la frontière des États-Unis, dans les régions sociosanitaires de la Montérégie et de l'Estrie. L'endémicité de la maladie de Lyme dans ces régions n'est d'ailleurs pas contestée (Ogden, Koffi, Pelcat et Lindsay, 2014b; Ogden et al., 2009). Les agrégats spatiotemporels de cas selon la date de déclaration représentent cette réalité le plus fidèlement possible, malgré la similitude des résultats obtenus pour ces deux définitions. Bien qu'il y ait un décalage entre la date de déclaration et le début des symptômes, celui-ci n'est pas assez important pour modifier les périodes d'endémicité des agrégats, et la plus grande taille d'échantillon ne fait qu'améliorer la puissance statistique.

Le risque d'acquisition de la maladie de Lyme est donc présent de manière significative dans sept agrégats au sud-ouest du Québec. Il est intéressant à noter que nous trouvons plusieurs parcs récréotouristiques dans ces agrégats, incluant le Mont-Saint-Bruno, le Mont-Saint-Hilaire, et plusieurs aires de camping et de randonnée dans la municipalité de Bromont. Trois agrégats sont à risque depuis 2013, alors que nous observons en effet une augmentation importante de cas déclarés depuis cette année. Ces trois agrégats sont d'ailleurs situés à la frontière même entre le Québec et

les États-Unis. Or, nous savons que la maladie de Lyme est un enjeu de santé publique dans les états du nord-est des États-Unis, et que l'apparition de cas au Québec est essentiellement liée à la migration nordique des tiques en lien avec les changements climatiques (Ogden, Barker, et al., 2006). Les quatre agrégats les plus récents sont devenus à risque depuis 2015 et 2016 et se retrouvent plus au nord de la frontière, soulignant à nouveau que la maladie de Lyme se propage plus profondément au Québec. Cette tendance se répète dans d'autres provinces du Canada, particulièrement à l'est de l'Ontario (Kulkarni, Narula, Slatculescu et Russell, 2019; Ogden, Koffi, Pelcat et Lindsay, 2014a).

Une étude basée sur la surveillance de données ontariennes pour la période 2010 – 2016 démontre que la maladie de Lyme y est tout autant en émergence qu'au Québec. Une apparition soudaine de cas y fut observée entre 2011 et 2013 et les cas se propagent également vers le nord (Kulkarni et al., 2019). L'année 2013 coïncide d'ailleurs avec une augmentation importante du nombre de cas déclarés au Québec. Étrangement, l'année 2013 a connu un hiver plus froid que la normale au Québec (Environnement et Changement climatique Canada, 2017). Pourtant, la saison hivernale de l'année 2012 était très douce, avec beaucoup de pluies et de verdure (Environnement et Changement climatique Canada, 2017). Il est possible qu'une proportion plus importante de tiques aient survécu cet hiver, permettant ainsi un taux de reproduction élevé durant l'été 2012 et cédant le passage à une population plus dense de tiques vers l'année 2013. Des agrégats de taux élevés de cas dans cette région ontarienne ont aussi été identifiés, en parallèle avec un large agrégat à risque de tiques infectées par *B. burgdorferi* recouvrant une grande surface de l'Est ontarien (Kulkarni et al., 2019). D'une manière comparable, des agrégats d'*I. scapularis* sont retrouvés au sud-ouest du Québec à une densité élevée et sa dispersion chevauche les agrégats identifiés dans notre étude, alors que le taux d'infection à *B. burgdorferi* était minime pour les tiques collectées entre 2004 et 2010, ce qui peut expliquer le faible nombre de cas déclarés durant cette période (Leighton et al., 2012; Ogden et al., 2019; Ogden et al., 2010).

## Limites

Bien que cette étude identifie les patrons spatiotemporels essentiels à la compréhension de l'émergence de la maladie de Lyme au Québec, il existe tout de même quelques limites à adresser. Au Canada et au Québec, la maladie de Lyme est une problématique de santé publique d'actualité et, malgré un meilleur niveau de sensibilisation depuis les dernières années, demeure quand même un enjeu relativement récent (Aenishaenslin et al., 2016). Il est probable que le nombre de cas réel de la maladie de Lyme est sous-représenté. Comme la maladie de Lyme est d'autant plus difficile à remarquer chez les patients atteints lors de l'apparition des premiers symptômes, les chances d'aller se faire consulter sont réduites. Dans le cas où une consultation médicale est effectuée, le clinicien devra ensuite être en mesure de poser un diagnostic correct, qui est d'autre part difficile à faire en stade précoce. Cette étape est particulièrement problématique en raison de la faible sensibilité des tests sérologiques. Après consultation, le clinicien responsable du patient devra ensuite transférer cette information aux autorités de santé publique afin que le patient soit déclaré en tant que cas de maladie de Lyme. En dépit des programmes de surveillance établis au Québec, plusieurs étapes doivent être prises afin qu'un cas soit déclaré, et des défis subsistent dans notre système. Nous pouvons donc raisonner que le nombre de cas de maladie de Lyme dans le registre des MADDO peut être sous-représenté, dans ce cas si attribuable au manque de connaissance générale chez les professionnels de la santé, à une pratique clinique moins qu'optimale, et à une forte dépendance aux tests sérologiques à faible sensibilité pour le dépistage en stade précoce, ce qui pourrait surreprésenter les cas en stade disséminé (Gasmi et al., 2017; INSPQ, 2016; Johnson et al., 2018; Lloyd et Hawkins, 2018).

Le manque de données pour plusieurs cas auxquelles une date du début des symptômes n'est pas indiquée peut potentiellement agir sur les analyses de surface de tendances de sorte à provoquer l'importante différence observée entre l'émergence perçue de la maladie de Lyme des

deux définitions de cas utilisées. Avec une taille d'échantillon déjà limitée pour l'analyse de surface de tendance, rajouter des critères de sélection pour n'inclure que les premiers cas avec une date de début des symptômes peut apporter de plus grandes variations et influencer la vitesse d'émergence de manière apparente.

Un obstacle supplémentaire de cette étude demeure le fait que l'échelle spatiale de l'endroit d'acquisition de Lyme pour chaque cas n'est pas optimale. Dans le registre des MADO, les nouveaux cas de Lyme ne sont identifiés que selon la municipalité d'exposition, ce qui est cependant vraisemblablement raisonnable d'un point de vue clinique et administratif. La géolocalisation des cas dans le contexte de cette étude est donc présentement limitée aux centroïdes de chaque municipalité. L'idéal serait d'obtenir une échelle spatiale plus précise afin d'introduire une meilleure modulation de la surface de tendance. À titre d'exemple, imaginons deux nouveaux cas déclarés dans deux municipalités avoisinantes. Si les deux cas acquis sont situés l'un à côté de l'autre, de sorte qu'ils sont à la frontière des deux municipalités, la vitesse d'émergence sera manifestement différente que s'ils sont acquis aux centres de ces municipalités. Ceci est particulièrement vrai dans un contexte où certaines municipalités couvrent de très grandes surfaces. Il est donc possible que l'émergence réelle de la maladie de Lyme au Québec ne soit pas bien représentée.

## **Conclusion**

Cette étude présente de nouvelles méthodes auparavant jamais appliquées pour la modélisation des patrons spatiotemporels de l'émergence de la maladie de Lyme au Québec. Nos résultats démontrent que la maladie de Lyme se propage vers le nord du Québec, découverte

d'ailleurs soutenue dans la littérature, et qu'il existe des agrégats significativement à risque dans une vaste région du sud-ouest bordant la frontière des États-Unis depuis 2013. Il serait d'ailleurs intéressant d'explorer dans une future étude non seulement comment les facteurs environnementaux et anthropiques décrits ci-dessus pourraient expliquer les tendances de propagation observées, mais aussi pourquoi certaines régions du Sud-ouest québécois, particulièrement celles à proximité des régions à risque élevé, n'ont toujours pas de cas déclarés de maladie de Lyme.

Il est espéré que ce présent projet sollicite l'attention des autorités de santé publique québécoises dans le but d'inspirer une nouvelle approche de gestion des risques contre la maladie de Lyme. Une compréhension de la vitesse d'émergence pourra servir d'outil à l'identification des couloirs de propagation de la maladie afin de soutenir des campagnes d'intervention et de prévention. Nous recommandons l'analyse de surface de tendance dans un contexte de surveillance en santé publique afin d'identifier les régions à risque et mieux cibler nos campagnes de sensibilisation à la fois pour les professionnels de la santé, mais aussi pour la population générale. En parallèle, une analyse d'agrégat spatiotemporel de cas peut servir non seulement à identifier, mais à étudier l'évolution des agrégats à risque dans le temps et dans l'espace pour appuyer les enquêtes épidémiologiques sur la maladie de Lyme. Ces approches permettraient d'améliorer les campagnes de prévention et de contrôle à la fois dans les régions endémiques et les régions encore saines.

Les prochaines étapes à entreprendre pour mieux comprendre les concepts explorés dans cette étude seraient d'inclure des covariables afin d'identifier les facteurs causaux des patrons spatiotemporels observés. Il serait intéressant de poursuivre nos analyses au niveau pancanadien et d'établir une compréhension des tendances générales de l'émergence de la maladie de Lyme et de déterminer si une analyse de surface de tendance peut servir comme outil de surveillance et d'aide

à la décision pour prévoir les futures régions à risque. Être en mesure d'utiliser une telle analyse à des fins de prévision serait un atout dans la lutte contre l'émergence des maladies infectieuses.

## Références

- Adam-Poupart, A., Milord, F., Thivierge, A., Therrien, C. et Irace-Cima, A. (2016). Plan d'analyse de surveillance intégrée de la maladie de Lyme: Institut national de santé publique.
- Aenishaenslin, C., Bouchard, C., Koffi, J. K. et Ogden, N. H. (2017). Exposure and preventive behaviours toward ticks and Lyme disease in Canada: Results from a first national survey. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 8(1), 112-118.
- Aenishaenslin, C., Bouchard, C., Koffi, J. K., Pelcat, Y. et Ogden, N. H. (2016). Evidence of rapid changes in Lyme disease awareness in Canada. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 7(6), 1067-1074.
- Allan, B. F., Keesing, F. et Ostfeld, R. S. (2003). Effect of forest fragmentation on Lyme disease risk. *Conservation Biology*, 17(1), 267-272.
- Bernier, M. (2017). L'utilisation d'Internet chez les Québécois. Repéré le 2 juillet 2019 à <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/science-technologie-innovation/bulletins/sti-bref-201711-2.pdf>
- Bowen, G. S., Schulze, T. L. et Parkin, W. L. (1984). Lyme disease in New Jersey, 1978-1982. *The Yale journal of biology and medicine*, 57(4), 661.
- Campbell-Lendrum, D., Manga, L., Bagayoko, M. et Sommerfeld, J. (2015). Climate change and vector-borne diseases: what are the implications for public health research and policy? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1665), 20130552.
- Camping Québec. (2018). Fréquentation des terrains de camping. Repéré le 27 avril 2018 à <https://www.campingquebec.com/fr/industrie/statistiques/statistiques/>
- CDC. (2011). Lifecycle of Blacklegged Ticks. Repéré le 22 janvier 2018 à <https://www.cdc.gov/lyme/transmission/blacklegged.html>
- CDC. (2018). Recent Surveillance Data. Repéré le 2 février 2019 à <https://www.cdc.gov/lyme/datasurveillance/recent-surveillance-data.html>
- CDC. (2019). Lyme Disease - Diagnosis and testing. Repéré le 23 septembre 2019 à <https://www.cdc.gov/lyme/diagnostesting/index.html>
- Chaire de tourisme Transat ESG UQAM. (2017). Étude des clientèles, des lieux de pratique et des retombées économiques et sociales des activités physiques de plein air. Repéré le 5 juillet 2019 à [https://chairedetourisme.uqam.ca/upload/files/%C3%89tude\\_Plein\\_air\\_rapport\\_final.pdf](https://chairedetourisme.uqam.ca/upload/files/%C3%89tude_Plein_air_rapport_final.pdf)

- Cheng, A., Chen, D. M., Woodstock, K., Ogden, N. H., Wu, X. T. et Wu, J. H. (2017). Analyzing the Potential Risk of Climate Change on Lyme Disease in Eastern Ontario, Canada Using Time Series Remotely Sensed Temperature Data and Tick Population Modelling. *Remote Sensing*, 9(6). doi: 10.3390/rs9060609
- CIRANO. (2018a). Répartition de la population active selon le secteur d'activité et le groupe d'âge, Québec, 2017. Repéré le 2 juin 2019 à <https://qe.cirano.qc.ca/theme/marche-travail/population-active/tableau-repartition-population-active-selon-secteur-dactivite-groupe-dage-quebec-2017>
- CIRANO. (2018b). Répartition de la population active selon le secteur d'activité et le sexe, Québec, 2017. Repéré le 2 juin 2019 à <https://qe.cirano.qc.ca/theme/marche-travail/population-active/tableau-repartition-population-active-selon-secteur-dactivite-sexe-quebec-2017>
- CIUSSS Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal. (2018). Fiche technique sur la maladie de Lyme – mise à jour 2018. Repéré le 15 mai 2019 à [https://santemontreal.qc.ca/fileadmin/fichiers/professionnels/DRSP/appel-vigilance/2018/Fiche\\_Tech\\_LYME\\_12072018.pdf](https://santemontreal.qc.ca/fileadmin/fichiers/professionnels/DRSP/appel-vigilance/2018/Fiche_Tech_LYME_12072018.pdf)
- Clow, K. M., Ogden, N. H., Lindsay, L. R., Michel, P., Pearl, D. L. et Jardine, C. M. (2017). The influence of abiotic and biotic factors on the invasion of *Ixodes scapularis* in Ontario, Canada. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 8(4), 554-563. doi: 10.1016/j.ttbdis.2017.03.003
- Cogliastro, A. et D'Orangeville, L. (2007). Organiser la cohabitation agriculture-forêt en Montérégie. *Mémoire présenté à la commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois (CAAAQ). Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) & Jardin Botanique de Montréal*, 14.
- Cormier, C., Côté, S., Mercure, M., Cerruti, A. et Minelli, F. (2012). Cadre méthodologique pour restaurer la connectivité écologique, de la planification à la conservation: étude de cas en Montérégie. *Le Naturaliste canadien*, 136(2), 95-100.
- Dautel, H., Kämmer, D. et Kahl, O. (2016). How an extreme weather spell in winter can influence vector tick abundance and tick-borne disease incidence (*Ecology and prevention of Lyme borreliosis* (p. 362): Wageningen Academic Publishers.
- DPH. (2018). A Brief History of Lyme Disease in Connecticut. Repéré le 22 janvier 2018 à <https://portal.ct.gov/DPH/Epidemiology-and-Emerging-Infections/A-Brief-History-of-Lyme-Disease-in-Connecticut>
- ECDC. (2009). Vector-borne diseases. Repéré le 17 mai 2019 à <https://ecdc.europa.eu/en/climate-change/climate-change-europe/vector-borne-diseases>
- Éditeur officiel du Québec. (1er avril 2019). Règlement ministériel d'application de la Loi sur la santé publique. Repéré le 12 juillet 2019 à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/cr/S-2.2,%20R.%202.pdf>



- Eisen, R. J., Eisen, L., Ogden, N. H. et Beard, C. B. (2016). Linkages of Weather and Climate With *Ixodes scapularis* and *Ixodes pacificus* (Acari: Ixodidae), Enzootic Transmission of *Borrelia burgdorferi*, and Lyme Disease in North America. *Journal of Medical Entomology*, 53(2), 250-261. doi: 10.1093/jme/tjv199
- Elliott, P. et Wartenberg, D. (2004). Spatial epidemiology: current approaches and future challenges. *112*(9), 998.
- Environnement et Changement climatique Canada. (2017). Les dix événements météorologiques les plus marquants au Canada. Repéré le 25 juillet 2019 à <https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=3318B51C-1>
- Ferrouillet, C., Milord, F., Lambert, L., Vibien, A. et Ravel, A. (2015). Lyme disease: Knowledge and practices of family practitioners in southern Quebec. *Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology*, 26(3), 151-156.
- Fiset, J., Tessier, N., Millien, V. et Lapointe, F. J. (2015). Phylogeographic Structure of the White-footed Mouse and the Deer Mouse, Two Lyme Disease Reservoir Hosts in Quebec. *Plos One*, 10(12). doi: 10.1371/journal.pone.0144112
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., . . . Gibbs, H. K. (2005). Global consequences of land use. *science*, 309(5734), 570-574.
- Gabriele-Rivet, V., Arsenault, J., Badcock, J., Cheng, A., Edsall, J., Goltz, J., . . . Ogden, N. H. (2015). Different Ecological Niches for Ticks of Public Health Significance in Canada. *Plos One*, 10(7). doi: 10.1371/journal.pone.0131282
- Gasmi, S., Ogden, N. H., Leighton, P. A., Adam-Poupart, A., Milord, F., Lindsay, L. R., . . . Thivierge, K. (2017). Practices of Lyme disease diagnosis and treatment by general practitioners in Quebec, 2008–2015. *BMC family practice*, 18(1), 65.
- Gasmi, S., Ogden, N. H., Leighton, P. A., Lindsay, L. R. et Thivierge, K. (2016). Analysis of the human population bitten by *Ixodes scapularis* ticks in Quebec, Canada: Increasing risk of Lyme disease. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 7(6), 1075-1081.
- Githeko, A. K., Lindsay, S. W., Confalonieri, U. E. et Patz, J. A. (2000). Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. *Bulletin of the World Health Organization*, 78, 1136-1147.
- Glavanakov, S., White, D. J., Caraco, T., Lapenis, A., Robinson, G. R., Szymanski, B. K. et Maniatty, W. A. (2001). Lyme disease in New York State: spatial pattern at a regional scale. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 65(5), 538-545.
- Gouvernement du Canada. (2017a). Maladie de Lyme. Repéré le 22 janvier 2018 à <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/maladie-lyme.html>

- Gouvernement du Canada. (2017b). Surveillance de la maladie de Lyme. Repéré le 11 octobre 2017 à <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/maladie-lyme/surveillance-maladie-lyme.html>
- Gouvernement du Canada. (2017c). Symptômes de la maladie de Lyme. Repéré le 10 octobre 2017 à <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/maladie-lyme/symptomes-maladie-lyme.html>
- Gouvernement du Canada. (2018a). Normales climatiques canadiennes. Repéré le 21 mars 2018 à [http://climat.meteo.gc.ca/climate\\_normals/index\\_f.html](http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/index_f.html)
- Gouvernement du Canada. (2018b). Pour les professionnels de la santé: maladie de Lyme. Repéré le 23 novembre 2018 à <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/maladie-lyme/pour-professionnels-sante-maladie-lyme.html>
- Hahn, M. B., Bjork, J. K., Neitzel, D. F., Dorr, F. M., Whitmarsh, T., Boegler, K. A., . . . Eisen, R. J. (2017). Evaluating acarological risk for exposure to *Ixodes scapularis* and *Ixodes scapularis*-borne pathogens in recreational and residential settings in Washington County, Minnesota. *Ticks and Tick-Borne Diseases*.
- Heymann, D. L. (2004). *Control of communicable diseases manual*. American Public Health Association.
- INSPQ. (2016). Plan d'analyse de surveillance intégrée de la maladie de Lyme Repéré le 2 avril 2018 à [https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2257\\_plan\\_analyse\\_surveillance\\_lyme.pdf](https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2257_plan_analyse_surveillance_lyme.pdf)
- INSPQ. (2017a). Portrait des zoonoses priorisées par l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques en 2015. Repéré le 17 mai 2018 à [https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2290\\_portrait\\_zoonoses\\_priorisees\\_2015.pdf](https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2290_portrait_zoonoses_priorisees_2015.pdf)
- INSPQ. (2017b). Recommandation de prophylaxie postexposition de la maladie de Lyme. Repéré le 17 mai 2018 à [https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2301\\_recommandation\\_prophylaxie\\_postexposition\\_maladie\\_lyme.pdf](https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2301_recommandation_prophylaxie_postexposition_maladie_lyme.pdf)
- INSPQ. (2018). Liste des municipalités à risque d'acquisition de la maladie de Lyme – Juin 2018 Repéré le 25 juillet 2019 à <https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/documents/zoonoses/municipalites-risque-maladie-lyme-juillet2018.pdf>
- INSPQ. (2019a). Formations offertes par l'Institut. Repéré le 15 mai 2019 à <https://www.inspq.qc.ca/formation/institut>
- INSPQ. (2019b). La maladie de Lyme et les maladies transmises par les tiques. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/zoonoses/maladie-de-lyme>

- Institut de la statistique du Québec. (2018). Le Québec chiffres en main. Repéré le 2 juin 2019 à [http://www.stat.gouv.qc.ca/quebec-chiffre-main/pdf/qcm2018\\_fr.pdf](http://www.stat.gouv.qc.ca/quebec-chiffre-main/pdf/qcm2018_fr.pdf)
- IUCN. (2018a). *Odocoileus virginianus*. Repéré à <https://www.iucnredlist.org/species/42394/22162580>
- IUCN. (2018b). *Peromyscus leucopus*. Repéré à <https://www.iucnredlist.org/species/16669/115136270>
- Jacob, J., Valois, P., Aenishaenslin, C., Bouchard, C., Briand, S., Talbot, D. et Tessier, M. (2019). Factors Leading Municipal Authorities to Implement Preventive Interventions for Lyme Disease. *International journal of environmental research and public health*, 16(9), 1547.
- Johnson, K. O., Nelder, M. P., Russell, C., Li, Y., Badiani, T., Sander, B., . . . Patel, S. N. (2018). Clinical manifestations of reported Lyme disease cases in Ontario, Canada: 2005–2014. *Plos One*, 13(6), e0198509.
- Kilpatrick, A. M., Dobson, A. D., Levi, T., Salkeld, D. J., Swei, A., Ginsberg, H. S., . . . Fish, D. (2017). Lyme disease ecology in a changing world: consensus, uncertainty and critical gaps for improving control. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1722), 20160117.
- Kilpatrick, A. M. et Randolph, S. E. (2012). Drivers, dynamics, and control of emerging vector-borne zoonotic diseases. *The Lancet*, 380(9857), 1946-1955.
- Kitron, U. et Kazmierczak, J. J. (1997). Spatial analysis of the distribution of Lyme disease in Wisconsin. *American journal of epidemiology*, 145(6), 558-566.
- Koffi, J. K., Leighton, P. A., Pelcat, Y., Trudel, L., Lindsay, L. R., Milord, F. et Ogden, N. H. (2012). Passive Surveillance for I. scapularis Ticks: Enhanced Analysis for Early Detection of Emerging Lyme Disease Risk. *Journal of Medical Entomology*, 49(2), 400-409. doi: 10.1603/me11210
- Kugeler, K., Jordan, R., Schulze, T., Griffith, K. et Mead, P. (2016). Will Culling White-Tailed Deer Prevent Lyme Disease? *Zoonoses and public health*, 63(5), 337-345.
- Kugeler, K. J., Farley, G. M., Forrester, J. D. et Mead, P. S. (2015). Geographic distribution and expansion of human Lyme Disease, United States. *Emerging infectious diseases*, 21(8), 1455-1457.
- Kulkarni, M. A., Narula, I., Slatculescu, A. M. et Russell, C. (2019). Lyme Disease Emergence after Invasion of the Blacklegged Tick, *Ixodes scapularis*, Ontario, Canada, 2010–2016. *Emerging infectious diseases*, 25(2), 328.
- Kulldorff, M. (2018). SaTScan User Guide for version 9.6. Repéré le 14 décembre 2018 à <https://www.satscan.org/>

- Lantos, P. M., Nigrovic, L. E., Auwaerter, P. G., Fowler Jr, V. G., Ruffin, F., Brinkerhoff, R. J., . . . Pan, W. K. (2015). *Geographic expansion of Lyme disease in the southeastern United States, 2000–2014*. Communication présentée Open forum infectious diseases.
- Leighton, P. A., Koffi, J. K., Pelcat, Y., Lindsay, L. R. et Ogden, N. H. (2012). Predicting the speed of tick invasion: an empirical model of range expansion for the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada. *Journal of Applied Ecology*, 49(2), 457-464. doi: 10.1111/j.1365-2664.2012.02112.x
- Lin, S., Shrestha, S., Prusinski, M. A., White, J. L., Lukacik, G., Smith, M., . . . Backenson, B. (2019). The effects of multiyear and seasonal weather factors on incidence of Lyme disease and its vector in New York State. *Science of the Total Environment*, 665, 1182-1188.
- Lindgren, E. et Gustafson, R. (2001). Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change. *The Lancet*, 358(9275), 16-18.
- Lloyd, V. et Hawkins, R. (2018). *Under-detection of Lyme disease in Canada*. Communication présentée Healthcare.
- Marrotte, R. R., Gonzalez, A. et Millien, V. (2017). Functional connectivity of the white-footed mouse in Southern Quebec, Canada. *Landscape Ecology*, 32(10), 1987-1998.
- Mayer, S. V., Tesh, R. B. et Vasilakis, N. (2017). The emergence of arthropod-borne viral diseases: A global prospective on dengue, chikungunya and zika fevers. *Acta tropica*, 166, 155-163.
- MDDELCC. (2016). Tendances des températures 1961-2010. Repéré le 21 mars 2018 à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/tendances/>
- MDDELCC. (2018). Précipitations en hausse depuis 1960 – l'équivalent d'un treizième mois ajouté au total annuel. Repéré le 21 mars 2018 à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/surveillance/1960-2015.htm>
- MDDELCC. (2019). Faits saillants. Repéré le 14 juillet 2019 à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/index.htm>
- Monaghan, A. J., Moore, S. M., Sampson, K. M., Beard, C. B. et Eisen, R. J. (2015). Climate change influences on the annual onset of Lyme disease in the United States. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 6(5), 615-622.
- Morrison, K. (2016). R package: outbreakvelocity. Repéré le 18 décembre 2018 à <https://github.com/kathrynmorrison/outbreakvelocity>
- MSSS. (2018). Définition nosologiques - 11e édition. Repéré le 27 mai 2019 à <http://publications.msss.gouv.qc.ca/msss/fichiers/2018/18-268-02W.pdf>
- MSSS. (2019). Maladie de Lyme. Repéré le 12 juin 2019 à <http://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/zoonoses/maladie-lyme/surveillance-de-la-maladie/>

- NIH. (2018). Lyme Disease Diagnostics Research. Repéré le 23 septembre 2019 à <https://www.niaid.nih.gov/diseases-conditions/lyme-disease-diagnostics-research>
- NIOSH. (2017). Lyme Disease. Repéré le 8 avril 2018 à <https://www.cdc.gov/niosh/topics/lyme/risks.html>
- Ogden, N., Bouchard, C., Badcock, J., Drebot, M., Elias, S., Hatchette, T., . . . Lubelczyk, C. (2019). What is the real number of Lyme disease cases in Canada? *BMC public health*, *19*(1), 849.
- Ogden, N., Koffi, J., Lindsay, L., Fleming, S., Mombourquette, D., Sanford, C., . . . Moore, S. (2015). Vector-borne diseases in Canada: Surveillance for Lyme disease in Canada, 2009 to 2012. *Canada Communicable Disease Report*, *41*(6), 132.
- Ogden, N., Koffi, J., Pelcat, Y. et Lindsay, L. (2014a). Lyme disease: Environmental risk from Lyme disease in central and eastern Canada: a summary of recent surveillance information. *Canada Communicable Disease Report*, *40*(5), 74.
- Ogden, N., Koffi, J., Pelcat, Y. et Lindsay, L. J. C. C. D. R. (2014b). Lyme disease: Environmental risk from Lyme disease in central and eastern Canada: a summary of recent surveillance information. *40*(5), 74.
- Ogden, N. H., Barker, I. K., Beauchamp, G., Brazeau, S., Charron, D. F., Maarouf, A., . . . Lindsay, L. R. (2006). Investigation of ground level and remote-sensed data for habitat classification and prediction of survival of *Ixodes scapularis* in habitats of southeastern Canada. *Journal of Medical Entomology*, *43*(2), 403-414. doi: 10.1603/0022-2585(2006)043[0403:Ioglar]2.0.Co;2
- Ogden, N. H., Bouchard, C., Kurtenbach, K., Margos, G., Lindsay, L. R., Trudel, L., . . . Milord, F. (2010). Active and Passive Surveillance and Phylogenetic Analysis of *Borrelia burgdorferi* Elucidate the Process of Lyme Disease Risk Emergence in Canada. *Environmental Health Perspectives*, *118*(7), 909-914. doi: 10.1289/ehp.0901766
- Ogden, N. H., Lindsay, L. R. et Leighton, P. A. (2013). Predicting the rate of invasion of the agent of Lyme disease *Borrelia burgdorferi*. *Journal of Applied Ecology*, *50*(2), 510-518. doi: 10.1111/1365-2664.12050
- Ogden, N. H., Lindsay, L. R., Morshed, M., Sockett, P. N. et Artsob, H. (2009). The emergence of Lyme disease in Canada. *Canadian Medical Association Journal*, *180*(12), 1221-1224.
- Ogden, N. H., Maarouf, A., Barker, I. K., Bigras-Poulin, M., Lindsay, L. R., Morshed, M. G., . . . Charron, D. F. (2006). Climate change and the potential for range expansion of the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada. *International Journal for Parasitology*, *36*(1), 63-70. doi: 10.1016/j.ijpara.2005.08.016
- Ogden, N. H., Mechai, S. et Margos, G. (2013). Changing geographic ranges of ticks and tick-borne pathogens: drivers, mechanisms and consequences for pathogen diversity. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, *3*. doi: 10.3389/fcimb.2013.00046

- OMS. (2014). A global brief on vector-borne diseases. Repéré le 22 janvier 2018 à [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/111008/1/WHO\\_DCO\\_WHD\\_2014.1\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/111008/1/WHO_DCO_WHD_2014.1_eng.pdf)
- OMS. (2017). Global vector control response 2017–2030. Repéré le 19 mai 2019 à <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259205/9789241512978-eng.pdf;jsessionid=FDD414ED9F0C238CAD6ADD651828A710?sequence=1>
- Ostfeld, R. S., Glass, G. E. et Keesing, F. (2005). Spatial epidemiology: an emerging (or re-emerging) discipline. *20*(6), 328-336.
- Québec. (2017). Maladie de Lyme. Repéré le 15 mai 2019 à <https://www.quebec.ca/sante/problemes-de-sante/a-z/maladie-de-lyme/>
- Rand, P. W., Lacombe, E. H., Dearborn, R., Cahill, B., Elias, S., Lubelczyk, C. B., . . . Smith Jr, R. P. (2007). Passive surveillance in Maine, an area emergent for tick-borne diseases. *Journal of Medical Entomology*, *44*(6), 1118-1129.
- Richard, S. et Oppliger, A. (2015). Zoonotic occupational diseases in forestry workers-Lyme borreliosis, tularemia and leptospirosis in Europe. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, *22*(1).
- Rogic, A., Tessier, N., Legendre, P., Lapointe, F. J. et Millien, V. (2013). Genetic structure of the white-footed mouse in the context of the emergence of Lyme disease in southern Quebec. *Ecology and Evolution*, *3*(7), 2075-2088. doi: 10.1002/ece3.620
- Roy-Dufresne, E., Logan, T., Simon, J. A., Chmura, G. L. et Millien, V. (2013). Poleward Expansion of the White-Footed Mouse (*Peromyscus leucopus*) under Climate Change: Implications for the Spread of Lyme Disease. *Plos One*, *8*(11). doi: 10.1371/journal.pone.0080724
- Sajanti, E., Virtanen, M., Helve, O., Kuusi, M., Lyytikäinen, O., Hytönen, J. et Sane, J. (2017). Lyme borreliosis in Finland, 1995–2014. *Emerging infectious diseases*, *23*(8), 1282.
- Schwartz, B. S. et Goldstein, M. D. (1990). Lyme disease in outdoor workers: risk factors, preventive measures, and tick removal methods. *American journal of epidemiology*, *131*(5), 877-885.
- Ścieszka, J., Dąbek, J. et Cieślík, P. (2015). Post-Lyme disease syndrome. *Reumatologia*, *53*(1), 46.
- Shapiro, E. D. (2014). Lyme disease. *New England Journal of Medicine*, *370*(18), 1724-1731.
- Simon, J. A., Marrotte, R. R., Desrosiers, N., Fiset, J., Gaitan, J., Gonzalez, A., . . . Millien, V. (2014). Climate change and habitat fragmentation drive the occurrence of *Borrelia burgdorferi*, the agent of Lyme disease, at the northeastern limit of its distribution. *Evolutionary Applications*, *7*(7), 750-764. doi: 10.1111/eva.12165

- Smith, G., Wileyto, E. P., Hopkins, R. B., Cherry, B. R. et Maher, J. P. (2016). Risk factors for Lyme disease in Chester County, Pennsylvania. *Public health reports*.
- Sokolow, S. H., Nova, N., Pepin, K. M., Peel, A. J., Pulliam, J. R., Manlove, K., . . . McCallum, H. (2019). Ecological interventions to prevent and manage zoonotic pathogen spillover. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1782), 20180342.
- Soucy-Gonthier, N., Marceau, D., Delage, M., Cogliastro, A., Domon, G. et Bouchard, A. (2003). Détection de l'évolution des superficies forestières en Montérégie entre juin 1999 et août 2002 à partir d'images satellitaires Landsat-TM. *Département de géographie de l'Université de Montréal, Réseau Ligniculture Québec, Institut de recherche en biologie végétale, Faculté de l'aménagement de l'Université de Montréal. Rapport présenté à l'Agence forestière de la Montérégie (AFM)*.
- Statistique Canada. (2017). Le français, l'anglais et les minorités de langue officielle au Canada. Repéré le 2 juin 2019 à <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/as-sa/98-200-x/2016011/98-200-x2016011-fra.cfm>
- Statistique Canada. (2019). 2011 Census - Boundary files. Repéré le 29 mars 2019 à <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/geo/bound-limit/bound-limit-2011-eng.cfm>
- Statistique Québec. (2019). Population et structure par âge et sexe. Repéré le 25 mars 2019 à <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/index.html>
- Steere, A. C., Coburn, J. et Glickstein, L. (2004). The emergence of Lyme disease. *The Journal of clinical investigation*, 113(8), 1093-1101.
- Steere, A. C. et Malawista, S. E. (1979). Cases of Lyme disease in the United States: locations correlated with distribution of *Ixodes dammini*. *Annals of internal medicine*, 91(5), 730-733.
- Steere, A. C., Strle, F., Wormser, G. P., Hu, L. T., Branda, J. A., Hovius, J. W., . . . Mead, P. S. (2016). Lyme borreliosis. *Nature reviews Disease primers*, 2, 16090.
- Stone, B. L., Tourand, Y. et Brissette, C. A. (2017). Brave new worlds: the expanding universe of Lyme disease. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 17(9), 619-629.
- Sutherst, R. W. (2004). Global change and human vulnerability to vector-borne diseases. *Clinical microbiology reviews*, 17(1), 136-173.
- Tran, P. M. et Waller, L. (2013). Effects of landscape fragmentation and climate on Lyme disease incidence in the northeastern United States. *EcoHealth*, 10(4), 394-404.
- Vandyk, J. K., Bartholomew, D. M., Rowley, W. A. et Platt, K. B. (1996). Survival of *Ixodes scapularis* (Acari: Ixodidae) exposed to cold. *Journal of Medical Entomology*, 33(1), 6-10.
- Wood, C. L. et Lafferty, K. D. (2013). Biodiversity and disease: a synthesis of ecological perspectives on Lyme disease transmission. *Trends in ecology & evolution*, 28(4), 239-247.

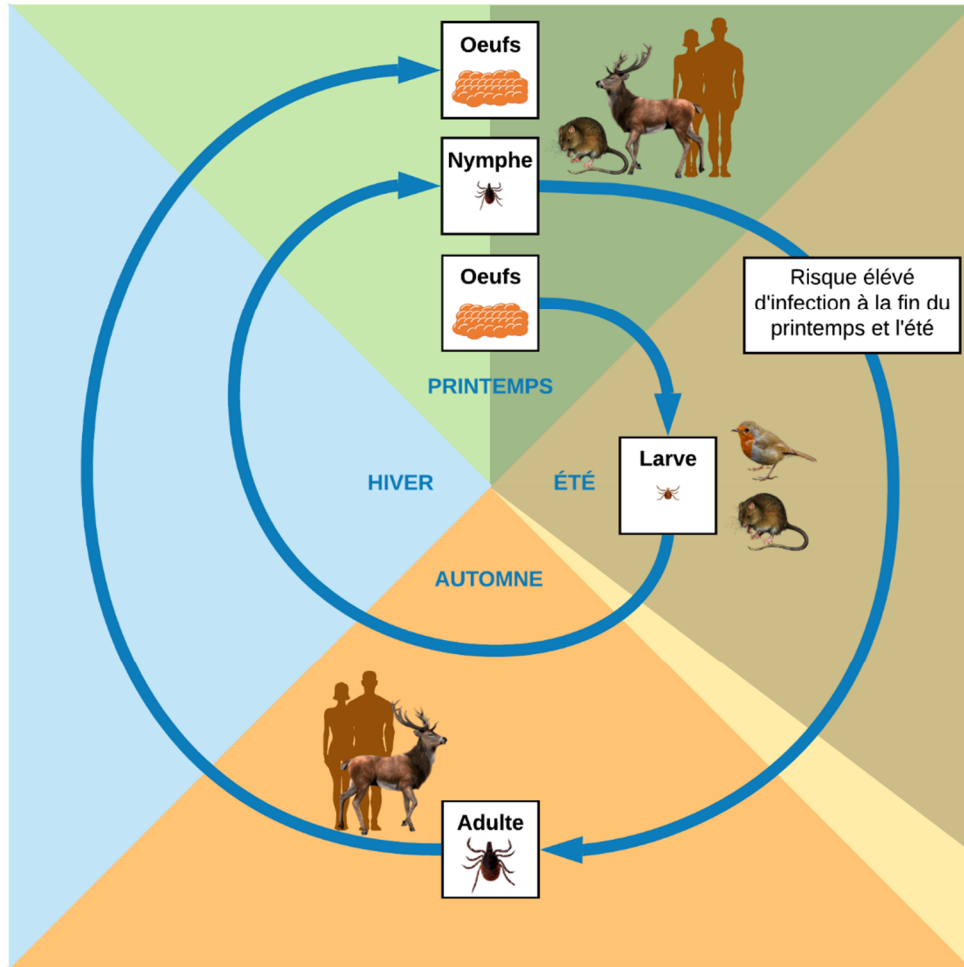
Zinszer, K., Morrison, K., Anema, A., Majumder, M. S. et Brownstein, J. S. (2015). The velocity of Ebola spread in parts of West Africa. *The Lancet Infectious Diseases*, 15(9), 1005-1007. doi: 10.1016/S1473-3099(15)00234-0

Zinszer, K., Morrison, K., Brownstein, J. S., Marinho, F., Santos, A. F. et Nsoesie, E. O. (2017). Reconstruction of Zika virus introduction in Brazil. *Emerging infectious diseases*, 23(1), 91. doi: 10.3201/eid2301.161274



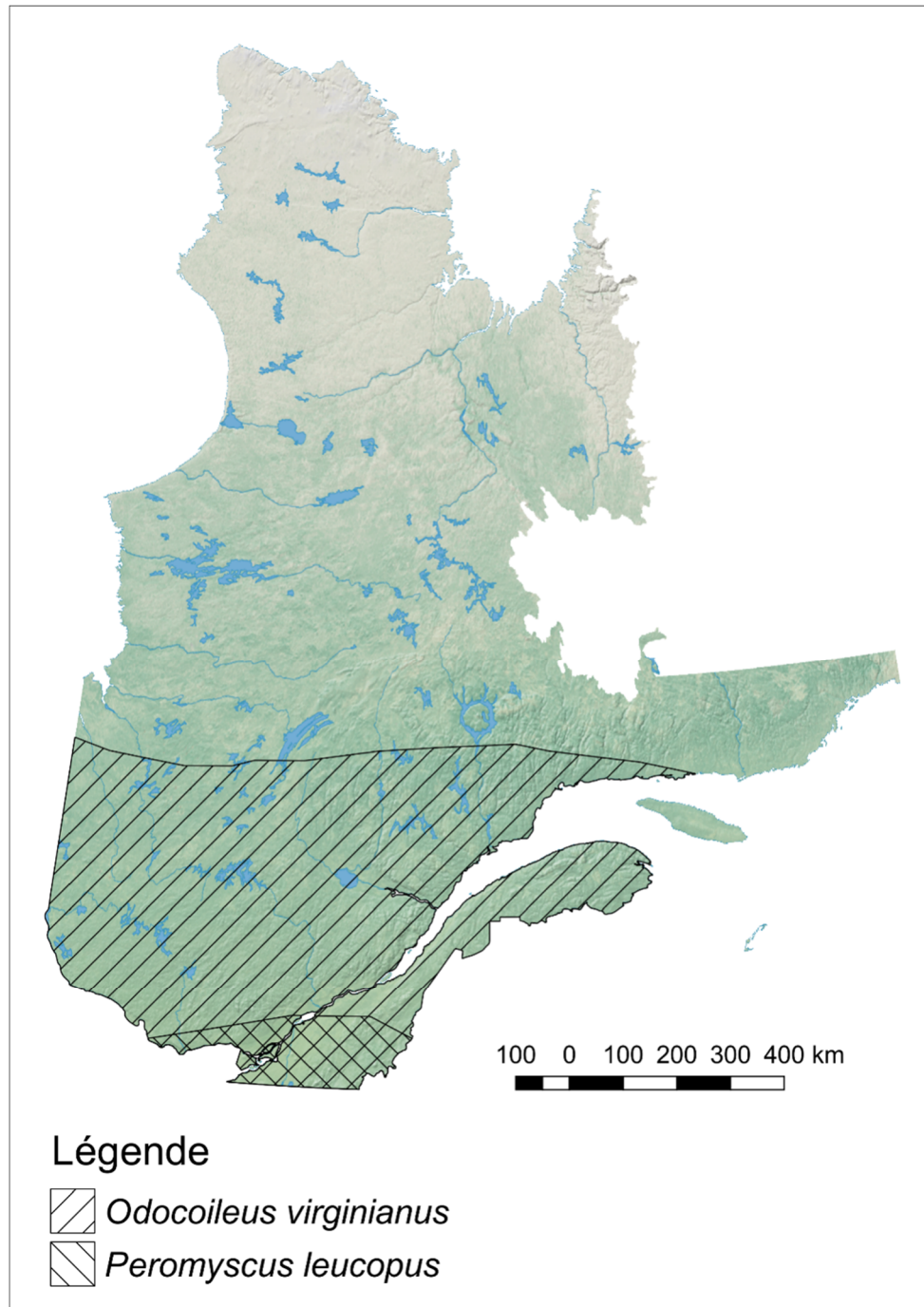
# Annexe A

Figure A. Cycle de vie d'*Ixodes scapularis* (CDC, 2011)



## Annexe B

Figure B. Distribution géographique de *Odocoileus virginianus* et *Peromyscus leucopus* au Québec (IUCN, 2018a, 2018b)



## Annexe C

Figure C. Symptômes de la maladie de Lyme (CIUSSS Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal, 2018)

Système	Stade localisé précoce (≤ 30 jours)	Stade disséminé précoce (≤ 3 mois)	Stade disséminé tardif (> 3 mois)
Peau	Érythème migrant (60-80%)	Multiples lésions d'érythème migrant	-
Musculosquelettique	Myalgies et arthralgies diffuses	Crises transitoires d'arthrite avec épanchements	Crises d'arthrite asymétrique prolongées
Neurologique	Légère rigidité de la nuque	Paralysie faciale, autres neuropathies crâniennes, méningite, radiculopathie	Polyradiculopathie chronique, atteintes discrètes des fonctions mentales
Cardiaque	-	Bloc auriculo-ventriculaire, péricardite, myocardite	-
Autres	Fièvre, fatigue, céphalées, anorexie, adénopathies	Fièvre, céphalées, fatigue, malaises importants, adénopathies	Fatigue, léthargie

## Annexe D

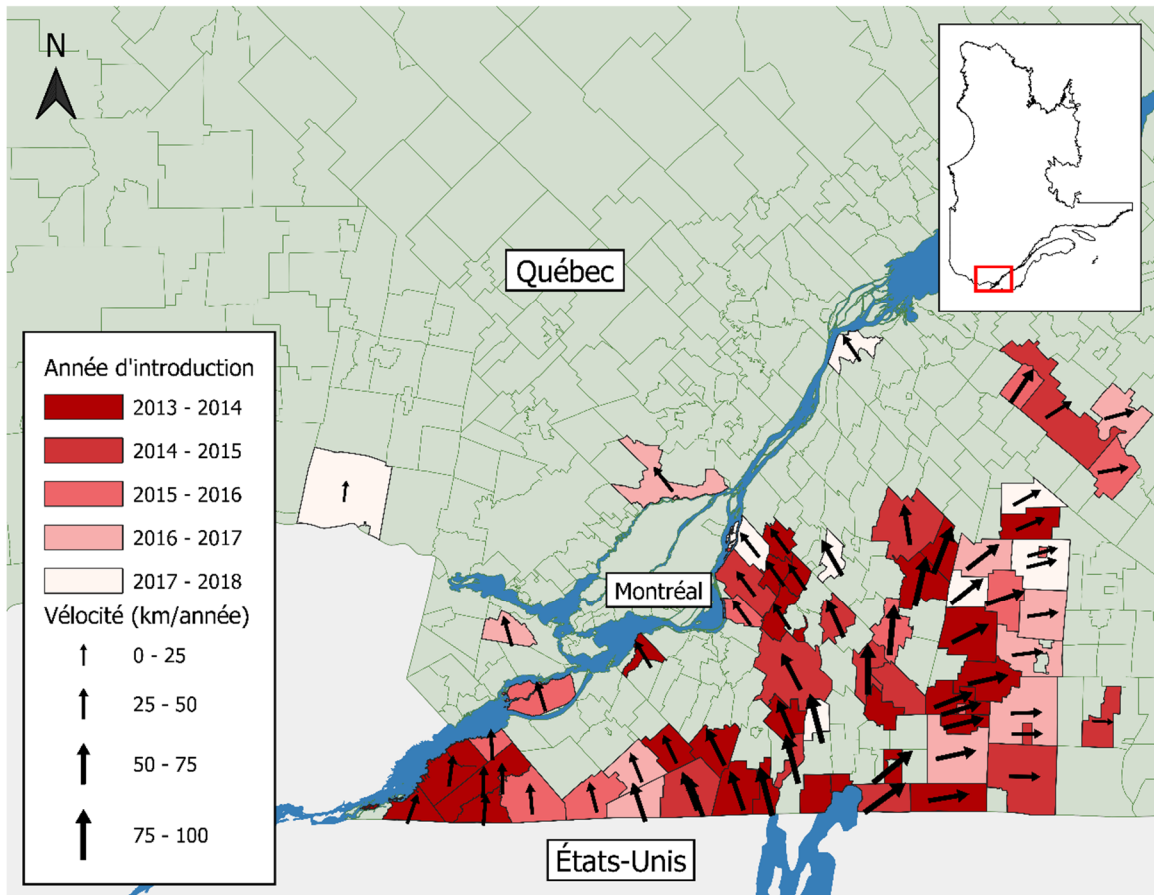
### Analyses de surface de tendance

Catégorie A : Cas selon la date de début des symptômes

*Définition A.2* : Municipalités avec au moins deux cas dans les cinq dernières années (N = 70)

La vitesse moyenne en utilisant la définition des régions à risque de l'INSPQ, soit au moins deux cas déclarés dans les cinq dernières années, est de 54 km/année pour 70 municipalités. La vitesse nette est de 42 km/année à 74° vers le nord-ouest, et la vitesse nette d'introduction nordique est 40 km/année. Seulement deux municipalités ont subi une émergence de moins de 25 km/année. Près de la moitié des municipalités (n=34) ont subi une vitesse d'émergence entre 25 et 50 km/année, en grande partie situé dans les régions sociosanitaires de la Montérégie et l'Estrie, alors que 34 municipalités ont subi des émergences entre 50 et 100 km/année, bordant la frontière de la Montérégie et de l'Estrie (Figure D.1).

Figure D.1. Vitesse d'émergence de la maladie de Lyme au Québec pour les municipalités ayant déclaré au moins deux cas dans les cinq dernières années, par date de début des symptômes (2013-2018)

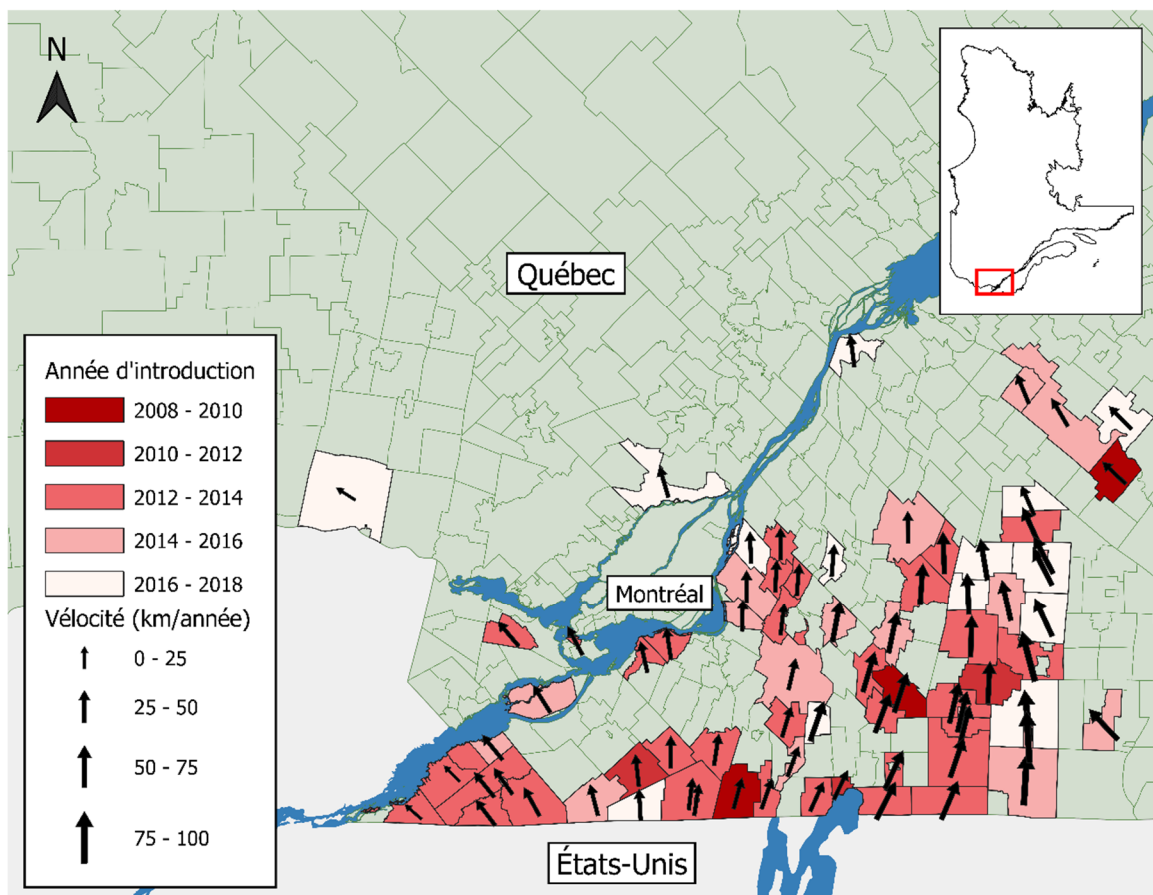


*Définition A.3* : Municipalités avec au moins deux cas dans toute la période d'étude (N = 72)

La vitesse moyenne pour les 72 municipalités avec au moins deux cas durant toute la période d'étude est de 48 km/année, avec une vitesse nette de 46 km/année à 93° vers le nord. La maladie de Lyme est introduite à une vitesse inférieure à 25 km/année dans 3 municipalités (4%), alors qu'elle est introduite entre 25 et 50 km/année dans 40 municipalités (56%) surtout regroupées en Montérégie. Il y a 25 municipalités (35%) en Montérégie et en Estrie qui ont subi une émergence

entre 50 et 75 km/année, alors que la maladie de Lyme a émergé à une vitesse entre 75 et 100 km/année dans quatre (6%) municipalités en Estrie (Figure D.2).

Figure D.2. Vitesse d'émergence de la maladie de Lyme au Québec pour les municipalités ayant déclaré au moins deux cas pendant la période d'étude, par date de début des symptômes (2008-2018)

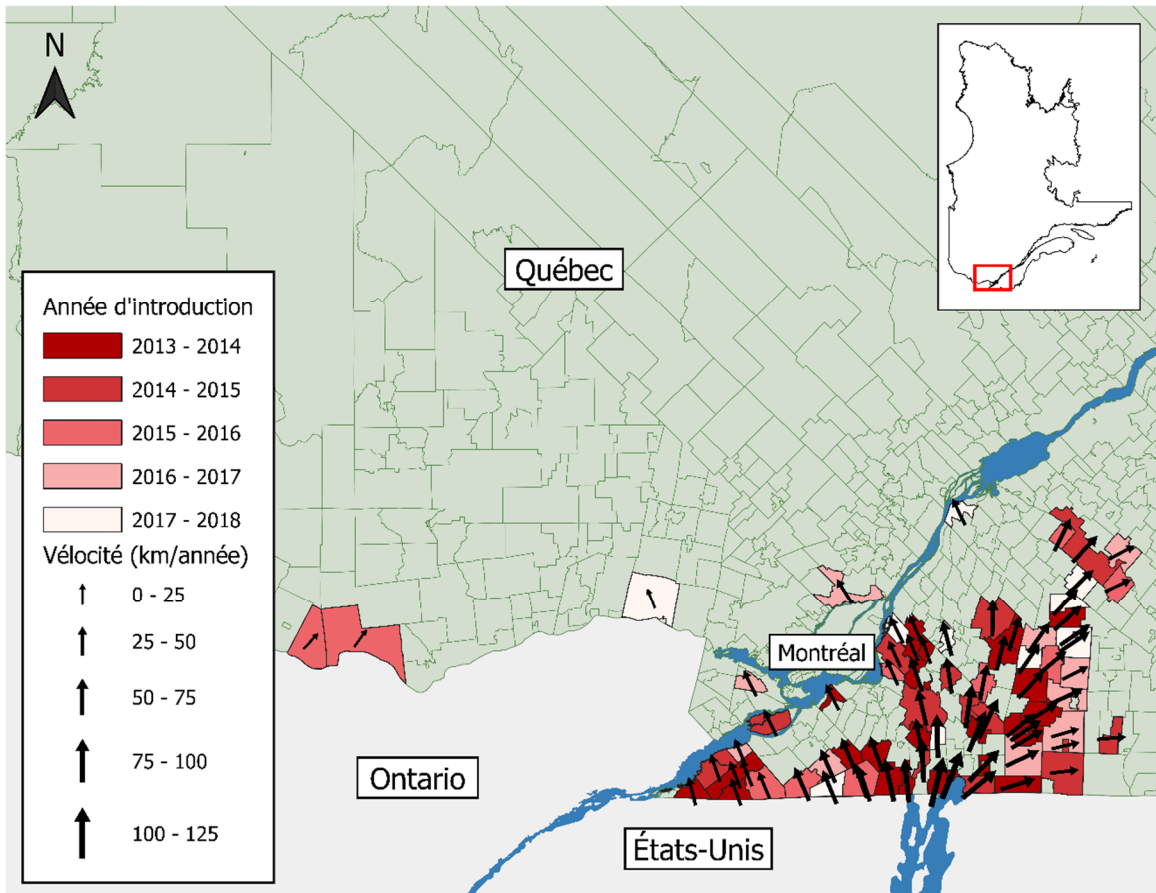


Catégorie B : cas selon la date de déclaration

*Définition B.2* : Municipalités avec au moins deux cas dans les cinq dernières années (N = 73)

La vitesse moyenne d'émergence est 57 km/année, avec une vélocité nette de 47 km/année à 72° vers le nord-ouest. La vitesse nette à 90° est 45 km/année. Il y a 28 municipalités (38%) avec des vitesses inférieures à 50 km/année, alors que trois de ceux-ci sont inférieures à 25 km/année. Dans 34 municipalités (47%), l'émergence se faisait entre 50 et 75 km/année. Neuf municipalités (12%) ont subi une introduction de Lyme entre 75 et 100 km/année, alors que deux (3%) l'ont subi entre 100 et 125 km/année. La majorité des municipalités se trouvent en Montérégie et l'Estrie (Figure D.3).

Figure D.3. Vitesse d'émergence de la maladie de Lyme au Québec pour les municipalités ayant déclaré au moins deux cas dans les cinq dernières années, par date de déclaration (2013-2018)

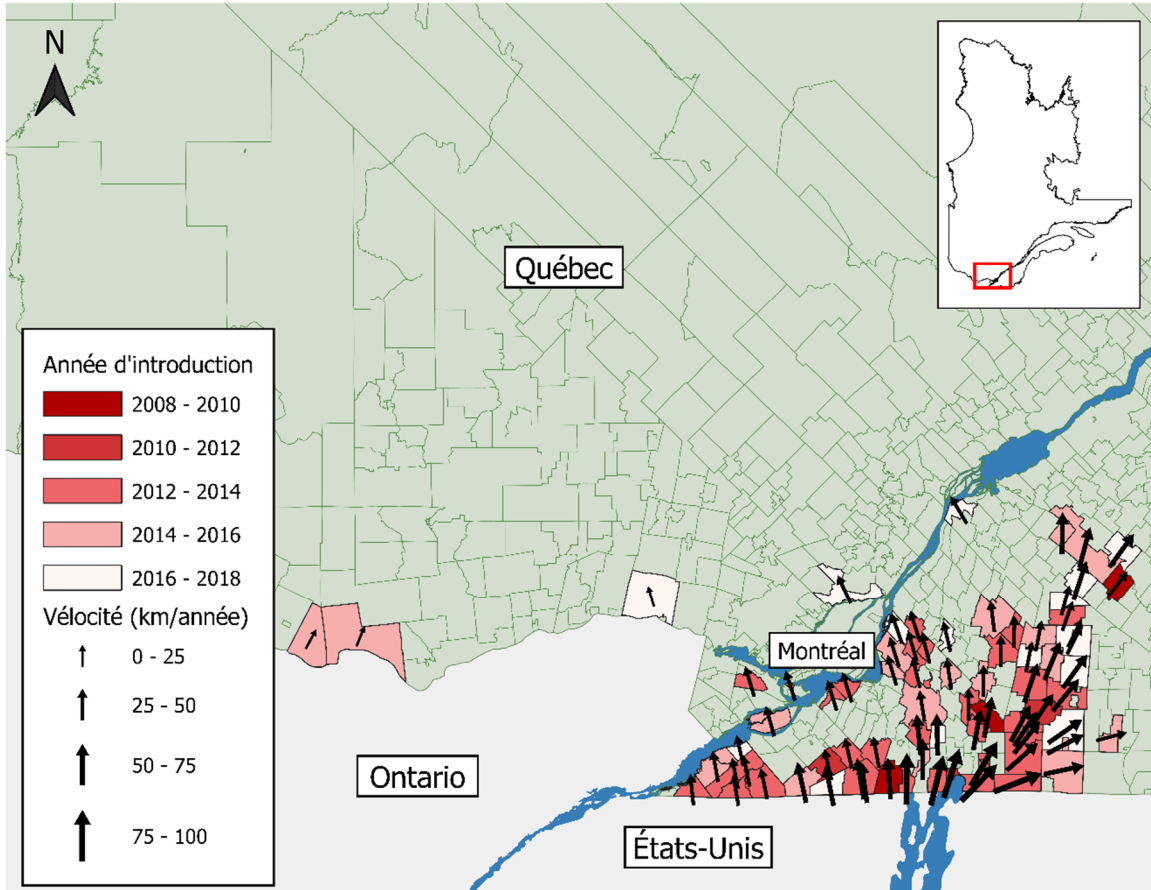




*Définition B.3* : Municipalités avec au moins deux cas dans toute la période d'étude (N = 75)

La vitesse moyenne d'introduction de Lyme était 49 km/année, la vélocité nette étant 44 km/année à 79° vers le nord-ouest. La vitesse nette nordique est également 44 km/année. Trois municipalités (4%) ont subi une émergence inférieure à 25 km/année, mais, comparativement à la distribution des municipalités par rapport à leur vitesse d'émergence de la *Définition A.3*, les cas de Lyme ont émergé entre 25 et 50 km/année dans 40 (53%) municipalités. La vitesse d'émergence était entre 50 et 75 km/année dans 26 municipalités (35%), et entre 75 et 100 km/année dans six (8%). Les municipalités sont regroupées en Montérégie et en Estrie, ainsi qu'au Centre-du-Québec (Figure D.4).

Figure D.4. Vitesse d'émergence de la maladie de Lyme au Québec pour les municipalités ayant déclaré au moins deux cas pendant la période d'étude, par date de déclaration (2008-2018)



## Annexe E

### Analyses d'agrégats purement spatiaux

Un total de onze agrégats de cas de maladie de Lyme ont été détectés pour les cas selon la date de début des symptômes, dont sept avec un seuil de signification  $\leq 0.05$  qui ont été sélectionnés. Pour les cas selon la date de déclaration, treize agrégats ont été détectés alors que six ont été retenus avec un seuil de signification  $\leq 0.05$ . Les agrégats se regroupent au sud-ouest du Québec au long de la frontière des États-Unis principalement dans les régions de la Montérégie et de l'Estrie, ainsi que dans la région du Centre-du-Québec. Les agrégats se retrouvent aux mêmes endroits et ne varient pas en tailles selon la définition retenue. L'exception unique est le septième agrégat additionnel pour les cas selon le début des symptômes qui se retrouve au Centre-du-Québec. Le cinquième agrégat pour les deux analyses a un radius de 0.00 km, car il représente le centroïde de la seule municipalité de Saint-Bruno-de-Montarville, en Montérégie. Le point a été agrandi dans les cartes pour mieux le visualiser. Ces agrégats varient au niveau du nombre de cas déclarés ainsi que leurs risques relatifs (RR). Le premier agrégat (1) pour les deux définitions, à l'ouest de l'Estrie, représente celui avec le plus de cas ainsi que le risque relatif le plus important avec 277 et 290 cas pour la date de début de symptômes et la date de déclaration, et un RR de 42.88 et 46.90, respectivement. Les agrégats suivants diminuent progressivement en nombre de cas et en RR, et ne varient pas de manière importante entre les deux définitions.

Figure E.1 Agrégats spatiaux de cas de maladie de Lyme au Québec entre 2006 et 2018 selon la date de début des symptômes

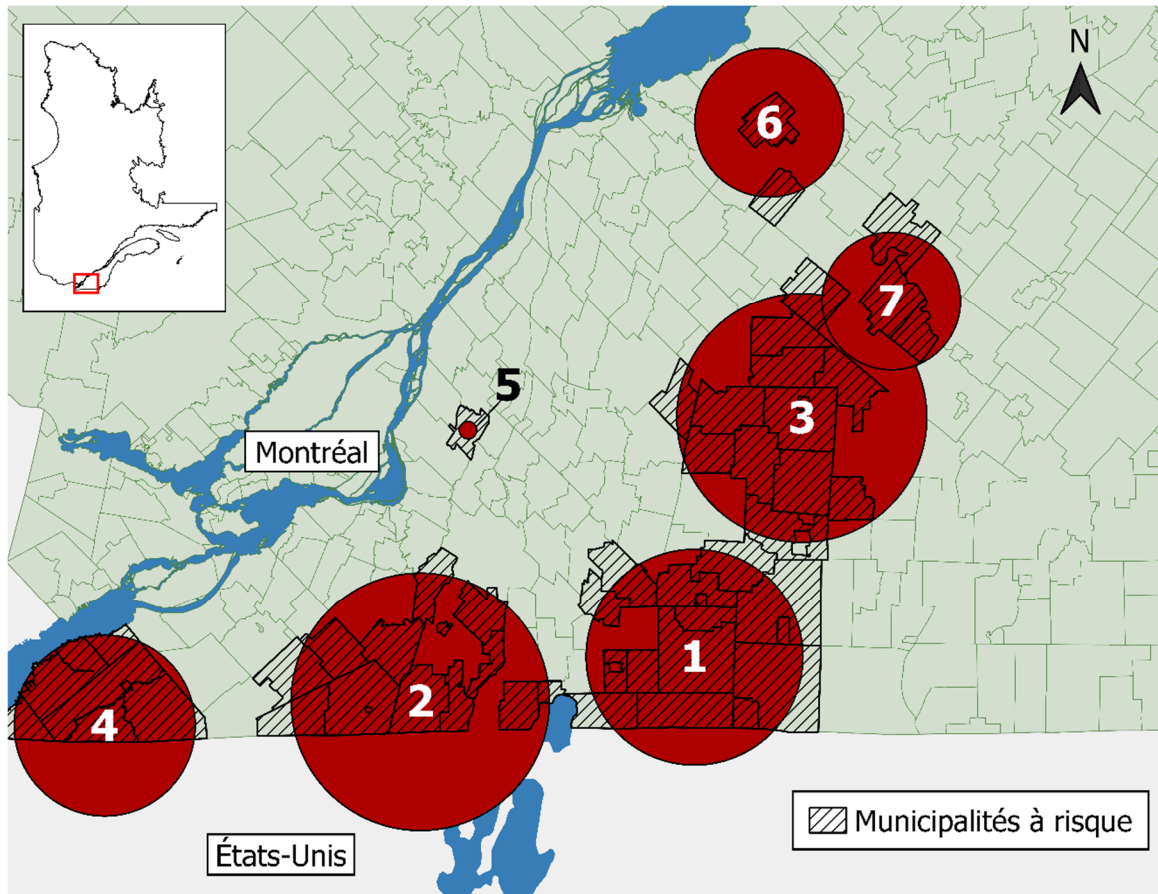


Tableau E.1. Variables des agrégats spatiotemporels de la Figure E.1

	Agrégats						
	1	2	3	4	5	6	7
Radius (km)	20.80	24.81	23.80	17.40	0.00	14.05	13.14
Municipalités à risque (nb)	15	14	13	7	1	2	3
Population à risque (nb de personnes)	52 676	26 434	34 222	10 738	26 453	2 074	3 420
Nb de cas déclarés	277	79	60	37	31	5	6
Nb de cas attendus	10.60	5.32	6.89	2.16	5.32	0.42	0.69
Incidence/100 000 personnes	40.5	23.0	13.5	26.5	9.0	18.5	13.5
Risque relatif	42.88	16.64	9.45	18.4	6.05	12.06	8.79
Valeur $p$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0095	0.011

Figure E.2. Agrégats spatiaux de cas de maladie de Lyme au Québec entre 2006 et 2018 selon la date déclaration

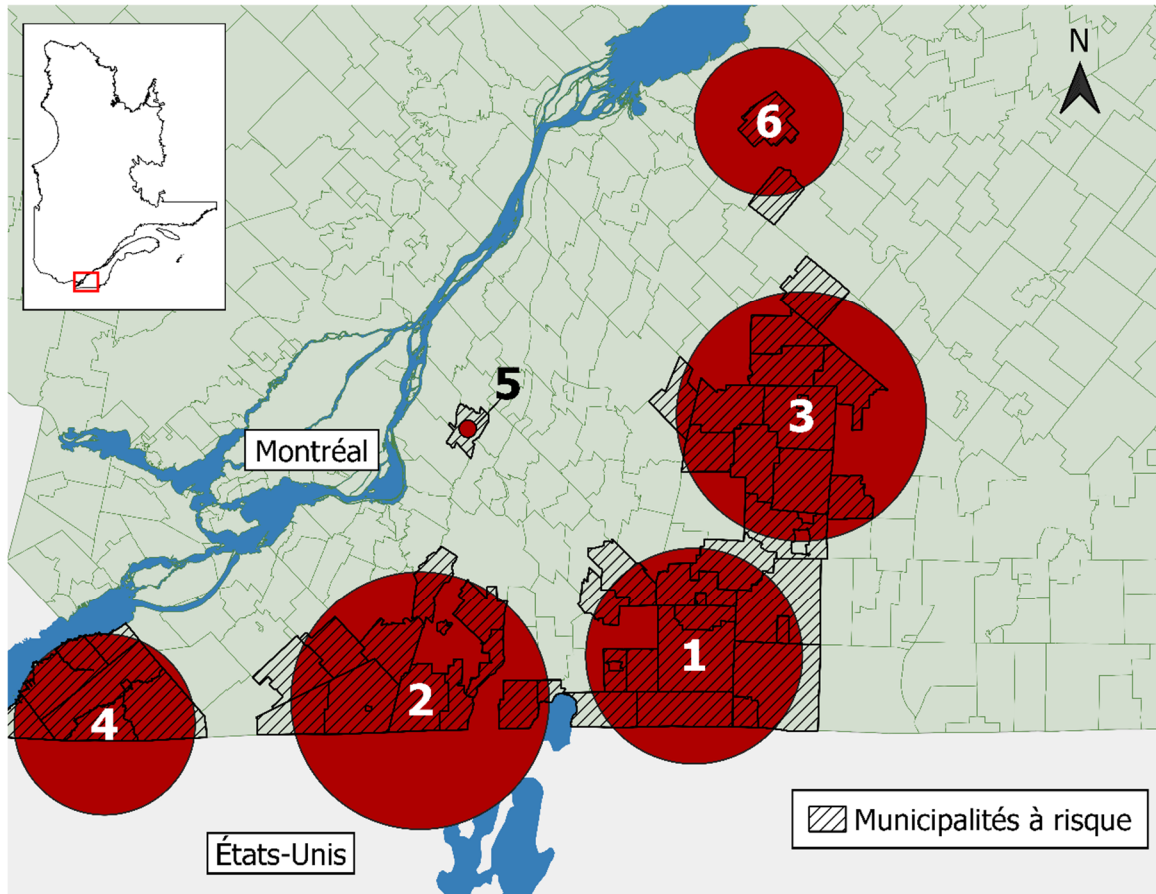


Tableau E.2. Variables des agrégats spatiotemporels de la Figure E.2

	Agrégats					
	1	2	3	4	5	6
Radius (km)	20.80	24.81	23.80	17.40	0.00	14.05
Municipalités à risque (nb)	15	14	13	7	1	2
Population à risque (nb de personnes)	52 675	26 423	34 222	10 739	26 453	2 074
Nb de cas déclarés	290	81	62	37	31	5
Nb de cas attendus	10.14	5.09	6.59	2.07	5.09	0.40
Incidence/100 000 personnes	42.4	23.6	13.9	26.5	9.0	18.5
Risque relatif	46.90	17.79	10.19	18.80	6.31	12.60
Valeur $p$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.011