

Université de Montréal

**Campylobactériose humaine et variations climatiques au Québec :
Analyse de séries temporelles selon les modèles SARIMA et SARIMAX**

Par

Christiane Carolle Lawson

Département de médecine sociale et préventive

École de santé publique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences en santé publique
option générale

Décembre 2018

©, Christiane Carolle Lawson, 2018

RÉSUMÉ

Au niveau mondial, les indicateurs climatiques sont de plus en plus décrits comme des facteurs associés aux zoonoses. L'objectif principal de cette étude a été de vérifier la relation entre les variations de la température ambiante maximale mensuelle et du niveau de précipitations totales mensuelles (incluant la neige et la pluie) et l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans trois régions sociosanitaires du Québec ayant des conditions climatiques différentes : Montréal, Mauricie-et-Centre-du-Québec et Capitale-Nationale. Une double analyse de séries temporelles selon les modèles SARIMA (*Seasonal Autoregressive integrated Moving Average*) et SARIMAX (*Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous variables*) a été réalisée sur la période de 2000 à 2015. Pour les trois régions sociosanitaires, l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose suivait une tendance saisonnière avec un pic entre juillet et août. Les modèles SARIMAX étaient les meilleurs modèles permettant d'apprécier l'association entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et les deux variables climatiques. Une corrélation positive entre la température maximale mensuelle et l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine était observée pour les régions de Montréal ($p < 0,0001$) et de Mauricie-et-Centre-du-Québec ($p = 0,0079$). Pour les précipitations, la corrélation était négative et significative seulement pour la région de Montréal ($p = 0,0004$). Il reste à explorer la corrélation avec plusieurs autres variables climatiques telles que les précipitations pluviales (sans la neige), l'humidité relative et la durée de la saison de croissance des végétaux ainsi qu'à élaborer des modèles SARIMAX de prédiction de l'incidence de la campylobactériose.

Nombre de mots : 249 mots

Mots-clés : Campylobactériose humaine – facteurs climatiques – Analyse de séries temporelles

ABSTRACT

At the global level, climate indicators are increasingly described as factors related to zoonosis. The main objective of this study was to verify the relationship between changes in monthly maximum ambient temperature and monthly total precipitation level (including snow and rain) and the cumulative monthly incidence of human campylobacteriosis in three health regions of Quebec with different climatic conditions: *Montréal*, *Mauricie-et-Centre-du-Québec* and *Capitale-Nationale*. A double time series analysis, SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) and SARIMAX (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous variables) was carried out over the period 2000-2015. For the three health regions, the campylobacteriosis cumulative monthly incidence followed a seasonal pattern with a peak between July and August. The SARIMAX models were the best models for assessing the association between the cumulative monthly incidence of human campylobacteriosis and the two climatic variables. A positive correlation between monthly maximum temperature and cumulative monthly incidence of human campylobacteriosis was observed for *Montréal* ($p < 0.0001$) and *Mauricie-et-Centre-du-Québec* ($p = 0.0079$) health regions. On the other hand, for total precipitation, the correlation was negative and significant only for *Montréal* ($p = 0.0004$). It remains to explore the link with several other climatic variables, such as rainfall, relative humidity and the length of the plant-growing season, as well as to develop SARIMAX models for campylobacteriosis incidence prediction.

Word count: 217 words

Keywords: Human campylobacteriosis – Climatic factors – Time-series analysis.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	vi
DEDICACES	viii
REMERCIEMENTS	x
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	2
1.2 Cadre conceptuel	3
1.3 Justification du choix de la campylobactériose humaine	5
1.4 Hypothèses de recherche	6
1.5 Objectifs	7
1.5.1 Objectif général	7
1.5.2 Objectifs spécifiques	7
CHAPITRE 2 : RECENSION DES ECRITS	8
2.1 Description de la procédure de recension des écrits	9
2.2 Définitions des concepts	9
2.3 La campylobactériose humaine	11
2.3.1 Généralités	11
2.3.2 Aspects épidémiologiques	12
2.4 Généralités sur le climat : la température ambiante et les précipitations	15
2.5 Entérozoonoses et climat à l'échelle mondiale et au Canada	16
CHAPITRE 3 : MÉTHODE	21
3.1 Nature et période de l'étude	22
3.2 Choix des régions sociosanitaires	22
3.3 Collecte des données	22
3.3.1 Données des cas humains de campylobactériose	22
3.3.2 Données climatiques	23
3.3.3 Données géographiques	23
3.4 Variables étudiées	24
3.5 Méthode d'analyse	25
3.5.1 Outils d'analyse	25
3.5.2 Généralité sur les séries temporelles	25

3.5.3	La méthode ARIMA de Box-Jenkins.....	26
3.6	Considérations éthiques.....	29
CHAPITRE 4 : MANUSCRIT		30
CHAPITRE 5 : DISCUSSION		58
5.1	Synthèse des résultats.....	59
5.2	Forces de l'étude	63
5.3	Limites de l'étude	63
CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		68
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		71
ANNEXES.....		78

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Liste des figures

- Figure a:** Cadre conceptuel retenu dans le cadre de ce mémoire
- Figure 1:** Tendances évolutives et distribution selon les mois, de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine, de 2000 à 2015 pour les régions sociosanitaires de Montréal (A; B), de Mauricie-et-Centre-du-Québec (C; D) et de la Capitale-Nationale (E; F)
- Figure 2 :** Comparaison des tendances évolutives de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine de 2000-2015 aux prévisions sur vingt-quatre mois, pour les régions sociosanitaires de Montréal (A), de Mauricie-et-Centre-du-Québec (B) et de la Capitale-Nationale (C)
- Figure 3:** Classification de Litynski appliquée au climat du Québec
- Figure 4:** Limites des régions sociosanitaires du Québec

Liste des tableaux

- Tableau I:** Corrélation croisée entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et les variables climatiques : température maximale mensuelle et précipitations totales mensuelles, dans les trois régions sociosanitaires
- Tableau II:** Résultats de l'analyse de séries temporelles SARIMAX pour les trois régions socio-sanitaires
- Tableau III:** Comparaison entre l'incidence cumulée mensuelle projetée sur deux ans (IP) et l'incidence cumulée mensuelle observée de 2016 et 2017 (IO) de la campylobactériose humaine dans les trois régions sociosanitaires
- Tableau IV:** Regroupement des dix-huit régions sociosanitaires en quatre zones climatiques

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ACF :	Auto correlation function
ACIA :	Agence canadienne d'inspection des aliments
AIC:	Akaike information criterions
AR:	Auto Regressive
ASPC:	Agence de santé publique du Canada
ARIMA:	Auto Regressive Integrated Moving Average
BIESP:	Bureau d'information et d'études en santé des populations
CEPCM:	Centre européen de prévention et contrôle des maladies
CERES:	Comité d'éthique de la recherche en santé
<i>C. fetus:</i>	<i>Campylobacter fetus</i>
<i>C. jejuni:</i>	<i>Campylobacter jejuni</i>
DRSP:	Direction régionale de santé publique
DRBST :	Direction des risques biologiques et de la santé au travail
<i>E. coli:</i>	<i>Escherichia coli</i>
GIEC:	Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat
INSPQ:	Institut national de santé publique du Québec
IRR:	Incidence rate ratio
MA:	Moving Average
MADO:	Maladie à déclaration obligatoire
MeSH:	Medical Subjects Headlings
MSSS:	Ministère de la Santé et des Services Sociaux
OMM:	Organisation Météorologique Mondiale
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
OR :	Odd ratio

PACF: Partial autocorrelation function

RSS: Région sociosanitaire

SARIMA: Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average

SARIMAX: Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average with Exogenous variables

DEDICACES

Je dédie ce mémoire

A mes chers Gracia et Graciano, votre passage a renforcé plus que jamais notre détermination sur le chemin. Vous êtes désormais les architectes de chacune de nos réalisations. Avec tous les anges du ciel, continuez d'intercéder pour votre famille.

A Paul et Philomène Lawson et à Nestor et Pauline Houeton, chers parents recevez ce travail en signe de ma reconnaissance quoiqu'insignifiante, pour tous vos sacrifices et vos prières qui nous accompagnent à chaque instant. Puisse le Tout Puissant vous donner santé et longue vie.

A toi Erick, ce travail est le tien. Ta présence rassurante ne cesse de rendre le chemin de plus en plus agréable chaque jour. Merci pour la lumière que tu apportes dans ma vie depuis plus de dix ans déjà ... Dieu a béni le chemin pour toujours! Qu'il nous accorde la grâce de l'abandon en tout temps.

A Graciella et Godgrace, adorables enfants, vous êtes au cœur de ce travail.

Sachez que je suis fière de chacune de vos réalisations. Soyez rassurés de mon soutien inconditionnel pour votre bonheur et votre réussite. Puisse Dieu vous protéger et vous accorder de grandir dans la paix et la sagesse.

REMERCIEMENTS

Je remercie

Mme Kate Zinszer PhD., Co-auteur du manuscrit, pour sa disponibilité et ses orientations sur l'élaboration de la méthode et la validation des résultats de l'analyse.

Mme Sadjia Bekal, PhD., du Laboratoire de santé publique du Québec.

Dr Patricia Turgeon, D.M.V., PhD., de la Faculté de médecine vétérinaire de l'Université de Montréal.

M Philippe Berthiaume, PhD., de la Faculté de médecine vétérinaire de l'Université de Montréal.

M Daniel Mckenney, PhD., du Service des Ressources naturelles Canada.

Mme Nathalie Gravel, Analyste en géomatique, responsable du Bureau d'information et d'études en santé des populations de l'INSPQ.

M Matthieu Tandonnet, Analyste en géomatique du Bureau d'information et d'études en santé des populations de l'INSPQ.

Toutes les Directions régionales de santé publique du Québec.

Toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont soutenue dans la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent particulièrement

A ma co-directrice Dr Alejandra Irace-Cima

Vos conseils et votre soutien ont été d'une utilité sans égale. Votre sens du travail bien fait et votre simplicité m'ont sincèrement marquée. Veuillez croire en ma profonde gratitude.

Sincère merci

A mon directeur Dr Julio C. Soto

Vous avez inspiré ce travail et œuvré à sa réalisation. Vous n'avez ménagé aucun effort pour le suivre dans le moindre détail. Votre simplicité, votre rigueur au travail et votre bienveillance sont autant de qualités qui font de vous un maître exceptionnel.

Profonde reconnaissance

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Problématique

Les maladies entériques d'étiologie infectieuse constituent un problème de santé publique important dans le monde entier. Elles représentent un fardeau économique significatif à cause notamment de la perte de productivité et des autres coûts apparentés. Même si la majorité des cas sont légers, certains d'entre eux peuvent être graves conduisant à une hospitalisation, à des maladies chroniques graves et même au décès. Aux États-Unis, Hoffman et al. ont estimé le fardeau économique annuel moyen de la campylobactériose à presque deux milliards de dollars en 2013, soit \$ 1 928 787 166 (1). Le nombre total de cas de campylobactériose estimé pour l'année 2013 aux États-Unis était de 845 024. Environ 94% des cas n'avaient pas consulté un médecin et auraient subi cependant une perte de productivité estimée à \$ 44 709 190. Un peu moins de 1% de décès était enregistré dans le groupe des patients hospitalisés pour infection à *Campylobacter* au cours de cette année et la perte économique liée à leurs années de vie perdues était estimée à \$ 657 959 135. (Annexe 1).

À travers le monde, plus de la moitié des maladies infectieuses transmissibles aux humains sont des zoonoses (2). Au Québec, plusieurs milliers de cas de zoonoses sont déclarés chaque année selon l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques (3). Le ministère de la santé et des services sociaux a rapporté pour l'année 2015, 6790 cas déclarés de maladies infectieuses entériques d'origine alimentaire ou hydrique. Ce nombre semble en augmentation par rapport à la période de 2011-2014 pour laquelle une moyenne annuelle de 6343 cas a été déclarée. Ce rapport indique une augmentation statistiquement significative de l'incidence cumulée annuelle de plusieurs maladies entériques d'origine alimentaire ou hydrique telles que : la salmonellose, l'amibiase, la cryptosporidiose, la yersiniose, la cyclospore et la shigellose (4). Elles sont des infections humaines dont le cycle de transmission hôte humain - hôte animal semble être influencé par plusieurs facteurs dont le climat (3). Les variations climatiques notamment l'augmentation de la température

ambiante, du taux d'humidité relative, des niveaux de précipitations et de la crue printanière des eaux offrent un environnement favorable à la prolifération, à la survie, à la distribution et à la transmission des microorganismes (5) et semblent évoluer parallèlement à l'augmentation des cas humains et des éclosions d'entérozoonoses émergentes ou récurrentes (6;7).

Au Canada, depuis les cinq dernières décennies, les températures moyennes annuelles ont augmenté d'environ 1,6°C et on estime que cette augmentation continuera et restera supérieure à celle de toutes les autres régions du monde (8). Le Québec a connu des températures moyennes supérieures à la valeur de référence (8) et a également enregistré le plus grand nombre d'événements climatiques extrêmes comme les tempêtes hivernales, les pluies violentes et les inondations (9). Des exemples de ces événements extrêmes sont : les inondations survenues à Montréal en 1987, au Saguenay en 1996, celles de la région des Bois Francs en 2003 (10) et la dernière inondation de 2017 ayant touché 132 municipalités principalement des régions de la Mauricie et de la Montérégie (11).

Devant une telle situation, on se demande, dans quelle mesure les tendances épidémiologiques des entérozoonoses sont associées aux variations climatiques observées.

1.2 Cadre conceptuel

Le cadre conceptuel retenu pour cette étude ([Figure a](#)) est celui élaboré par l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) pour le projet « Entérozoonoses et variations climatiques au Québec » (12). Il relie les variations climatiques, les entérozoonoses et la triade agent-hôte-environnement.

Les facteurs climatiques les plus étudiés sont la température ambiante, les précipitations et l'humidité. Les variations de ces facteurs influencent la triade agent-hôte-environnement et par le même fait l'incidence annuelle cumulée des maladies infectieuses (7).

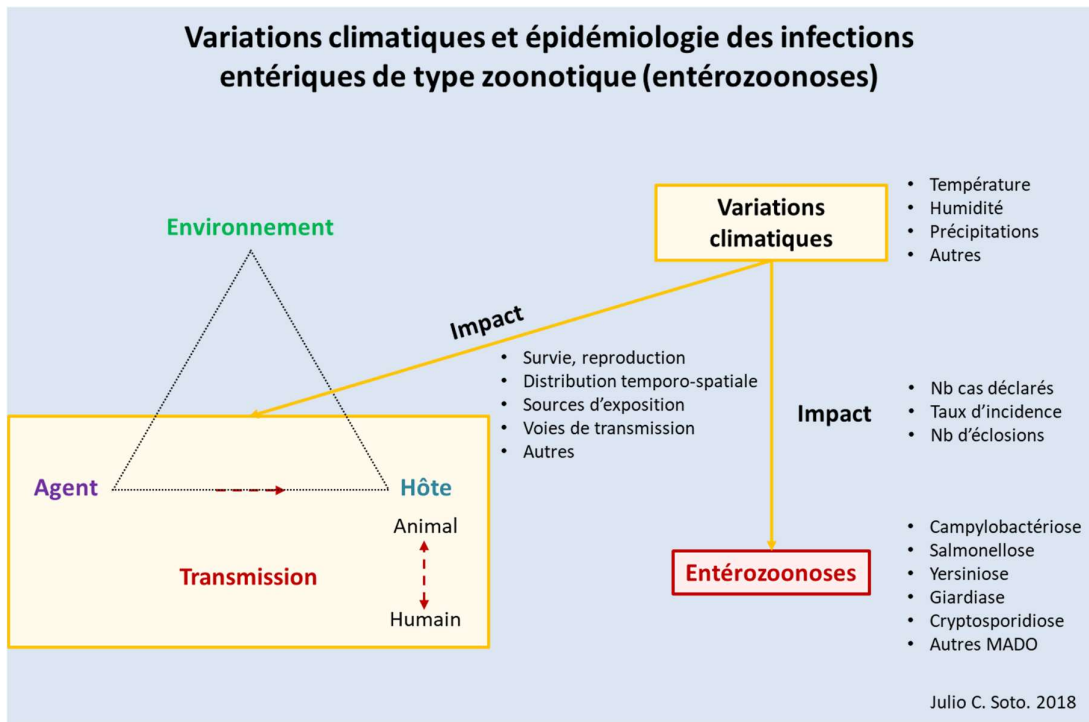


Figure a: Cadre conceptuel retenu dans le cadre de ce mémoire

Source : Soto J. Direction des risques biologiques et de la santé au travail (DRBST), INSPQ. 2018. (12)

Dans le cas des entérozoonoses, l'augmentation de la température ambiante pourrait être à l'origine de la modification des saisons de transmission et de la répartition des hôtes porteurs de maladie (13). Les élévations graduelles de la température ambiante, des précipitations et de l'humidité représentent des conditions favorables au développement et à la survie de nouveaux pathogènes, à leur introduction au sein des troupeaux d'élevage et à leur transmission vers des hôtes par contact direct ou indirect (véhiculés par l'eau, les aliments ou transportés par des vecteurs animaux) (14). Ainsi, des facteurs tels que, la présence de cours d'eau et de fermes animalières dans l'environnement pourraient avoir un impact sur l'incidence des entérozoonoses. Les températures chaudes favorisent dans le même temps l'augmentation de la durée de contact de l'être humain avec l'environnement, à travers diverses activités d'extérieur, entraînant ainsi un contact plus accru des agents infectieux avec l'hôte humain et augmentant le risque de contamination et de transmission de l'infection. Cette situation pourrait justifier les pics d'augmentation de l'incidence des entérozoonoses, observés pendant l'été. Par ailleurs,

l'âge (enfants et personnes âgées) et le statut immunitaire (sujet immunosupprimés ou porteurs de maladies chroniques) sont également des facteurs de risque qui pourraient influencer l'incidence de la maladie, cependant, dans le cadre de cette étude écologique incluant des données agrégées au niveau populationnel, l'impact de ces facteurs ne pourra pas être contrôlé. Seule la campylobactériose, fera l'objet du présent mémoire.

1.3 Justification du choix de la campylobactériose humaine

La campylobactériose est une infection récurrente au Canada et la plus rapportée des entérozoonoses au Québec avec une incidence cumulée annuelle d'environ 30 pour 100 000 habitants en 2015 (4). Elle a déjà été rapportée en association directe avec la température ambiante et les précipitations dans plusieurs études antérieures (15-25) réalisées à l'étranger et au Canada (Québec). Au Québec, Bekal et al. (2017) ont étudié l'association entre la température ambiante et l'incidence cumulée hebdomadaire de trois zoonoses entériques (salmonellose, campylobactériose et giardiase) de 2000 à 2015, dans les régions sociosanitaires (RSS) de Montréal, de la Montérégie et de la Capitale Nationale (les plus peuplées du Québec) sur la période de 2000 à 2015. Cependant, les résultats obtenus ont été paradoxaux par rapport à ceux d'autres chercheurs ayant étudié le même sujet et suggèrent que d'autres indicateurs climatiques non étudiés tels que les précipitations pourraient avoir un impact plus important que la température ambiante sur l'incidence cumulée hebdomadaire des entérozoonoses. Ils concluent sur le besoin de réaliser de futurs travaux afin « *d'obtenir une meilleure compréhension de l'effet de la température et d'autres variables climatiques ainsi que de leur interaction sur l'incidence des zoonoses entériques au Québec* » (26).

Tout ceci a justifié la présente étude dont le but était d'améliorer la surveillance de la campylobactériose humaine en mettant en évidence l'influence des facteurs étudiés et en

développant de nouveaux indicateurs. L'approche méthodologique était différente de celle de l'étude de Bekal et al. En effet, le choix des régions sociosanitaires étudiées a été fait sur la base des caractéristiques bioclimatiques, plutôt que par la taille de la population. Deux variables climatiques (température ambiante maximale et précipitations totales) ont été étudiées au lieu d'une seule (température ambiante moyenne). Les modèles de séries temporelles ont été construits sur la base des observations mensuelles plutôt qu'hebdomadaires.

1.4 Hypothèses de recherche

Notre étude repose sur le postulat selon lequel il existe une association entre l'évolution de l'incidence cumulée de la campylobactériose et les variations de la température ambiante maximale et du niveau de précipitations totales observées au Québec de 2000 à 2015.

La recension des écrits scientifiques, nous a permis d'émettre les hypothèses de recherche suivantes :

- Il existe une association entre la température ambiante mensuelle et l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans les régions étudiées.
- Il existe une association entre les précipitations totales mensuelles et l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans les régions étudiées.
- L'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine peut être prédite par les modèles de séries temporelles SARIMA et SARIMAX dans les régions étudiées.

1.5 Objectifs

1.5.1 Objectif général

L'objectif général est d'identifier des indicateurs climatiques qui pourraient être utilisés pour la surveillance de la campylobactériose au Québec et pour orienter les efforts de prévention et de contrôle de cette dernière.

1.5.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de l'étude sont les suivants :

- 1) Décrire l'évolution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans trois régions sociosanitaires du Québec de 2000 à 2015.
- 2) Analyser l'association entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et la température ambiante mensuelle ainsi que les précipitations totales mensuelles, pour la même période d'étude dans ces trois régions sociosanitaires.
- 3) Identifier le meilleur modèle prédictif de l'évolution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine au Québec.

CHAPITRE 2 : RECENSION DES ECRITS

2.1 Description de la procédure de recension des écrits

Une recension des écrits sous forme de « *scooping review* » a été réalisée pour la période du 1^{er} janvier 2000 au 31 janvier 2017 portant sur les variations climatiques, l'épidémiologie et les infections entériques humaines. La recherche visait des publications scientifiques et la littérature grise utilisant des mots clés et descripteurs en français et en anglais, adaptés à notre étude. A l'aide des opérateurs booléens et de la troncature astérisque (*), nous avons bâti le plan conceptuel de la recherche documentaire qui comprenait une approche simple avec mots clés ainsi qu'une recherche avancée avec les termes MeSH (*Medical Subjects Headings*) (Annexes 2 et 3). Nous avons ainsi exploré les bases de données informatisées, *Ovid MEDLINE* et *PubMed* et le moteur de recherche *Google Scholar*. Sur un total de 366 articles identifiés au départ, 166 étaient des doublons et 156 avaient soit un titre non pertinent, soit ils étaient inaccessibles ou incomplets et ont dû être retirés. Quarante-quatre publications faisant une association entre les entérozoonoses et les facteurs climatiques étaient jugées pertinentes pour cette étude et d'autres publications ont été rajoutées à partir des références des publications pertinentes et de la littérature grise.

2.2 Définitions des concepts

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les **zoonoses** sont des maladies infectieuses naturellement transmissibles des animaux vertébrés à l'homme et vice versa. Elles peuvent être causées par des agents microbiens pathogènes tels que les bactéries, les parasites, les champignons, les virus et les prions (28). De cette définition découle celle des **entérozoonoses** ou **zoonoses entériques** qui regroupent toutes les maladies zoonotiques causant des infections du tractus digestif. Il s'agit principalement de la campylobactériose, de la salmonellose, de la giardiase, de la cryptosporidiose et de l'infection à *Escherichia coli* entérotoxigène (29).

Le **climat** se définit comme le temps moyen qu'il fait d'une journée à l'autre (4). Il se mesure par des paramètres tels que : la température, les précipitations, l'humidité relative, la couverture nuageuse et le vent (30).

Le terme **température** désigne la température de l'air en degré Celsius (°C). Les températures maximale et minimale représentent respectivement la température la plus élevée et la plus basse observée à un endroit au cours d'un intervalle de temps donné (31).

Les **précipitations** représentent toutes les formes d'eau, liquides ou solides, qui tombent d'un nuage et atteignent le sol, incluant la bruine, la bruine verglaçante, la pluie verglaçante, la grêle, les cristaux de glace, les granules de glace, la pluie, la neige, la neige roulée et la neige en grains. Elles se mesurent en millimètre (mm). Les **précipitations totales** sont la somme des précipitations pluviales et de l'équivalent en eau, de la neige observée à un endroit donné au cours d'un intervalle de temps. Ainsi, les **précipitations pluviales** incluent toutes les précipitations liquides à savoir : la pluie, la bruine, la pluie verglaçante et la grêle, observées à un endroit donné au cours d'un intervalle de temps déterminé (31).

L'**humidité relative** est le rapport de la quantité d'eau réellement présente dans l'air à la quantité maximale qui y serait présente si l'air était saturé à une température donnée. Elle est généralement exprimée en pourcentage (31).

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), les **variations climatiques** se rapportent aux écarts observés par rapport à la moyenne ou aux variations saisonnières et cycliques, des différents paramètres climatiques. Elles se distinguent du terme **changement climatique** qui concerne toutes les variations de l'état du climat décelables au moyen de tests statistiques, par des modifications de la moyenne et ou de la variabilité de ses propriétés et qui persistent généralement pendant plusieurs décennies, qu'elles soient dues à la variabilité

naturelle ou à l'activité humaine (30). Dans le cadre de ce mémoire, ce sont les variations climatiques qui ont été étudiées.

2.3 La campylobactériose humaine

2.3.1 Généralités

La campylobactériose est une infection intestinale causée par une bactérie du genre *Campylobacter* ayant environ seize espèces, dont les plus fréquemment impliquées sont *C. jejuni* et *C. coli* chez l'adulte et *C. fetus* chez le nouveau-né (32).

Cliniquement, la campylobactériose humaine se manifeste par un tableau de gastroentérite aiguë qui survient après une période d'incubation moyenne de 24 à 72 heures et évolue souvent vers une guérison spontanée au bout de sept jours en moyenne (33). Cependant, environ 20% des cas sévères peuvent évoluer à court terme vers une septicémie ou une méningite. A long terme, ces patients peuvent développer également des maladies auto-immunes graves, telles que le syndrome de Guillain Barré, le syndrome de Miller Fisher, l'arthrite réactive et le syndrome du côlon irritable (34). Les groupes les plus à risque de complication sont les nouveau-nés, les enfants, les personnes âgées et les sujets immunosupprimés (35). En dehors de l'âge, et du statut immunitaire, d'autres facteurs tels que le voyage à l'étranger, le statut social, l'appartenance ethnique, le milieu de résidence, la saisonnalité et les facteurs météorologiques influencent la variation du risque de campylobactériose humaine (36).

Le traitement est symptomatique et se limite au maintien de l'hydratation et de l'équilibre hydroélectrolytique. Une antibiothérapie à base d'érythromycine est recommandée systématiquement pour les personnes immunosupprimées et s'avère nécessaire lorsque la diarrhée est sanguinolente, s'accompagne de forte fièvre ou dure plus de sept jours (36).

Plusieurs mesures de prévention sont efficaces et concernent notamment le respect des mesures d'hygiène telles que le lavage des mains, la désinfection des surfaces potentiellement

contaminées par les selles, le respect des règles de sécurité alimentaire et l'éviction de la consommation d'eau de baignade (33).

2.3.2 Aspects épidémiologiques

Incidence

Selon l'OMS, la campylobactériose est la plus fréquente des gastroentérites bactériennes humaines dans le monde (37).

Dans les pays industrialisés, l'incidence cumulée est variable. Le Centre européen de prévention et contrôle des maladies (CEPCM) rapporte depuis 2005, une moyenne annuelle de 200 000 cas de campylobactériose humaine pour les 28 pays participant à la surveillance. En 2007, l'incidence cumulée annuelle pour l'Europe était estimée à 51,6 pour 100 000 habitants (38).

En 2003, en Nouvelle-Zélande, pays dont le secteur agroalimentaire occupe la première place dans l'économie, on a observé la plus forte incidence annuelle cumulée de campylobactériose humaine soit 396 pour 100 000 habitants (39) par rapport aux autres pays. Selon les chercheurs, cette situation serait probablement liée à la contamination d'une grande partie des produits de volaille au *Campylobacter* au cours de cette période. Aux États-Unis, la campylobactériose a été la deuxième cause des gastroentérites déclarées (après la salmonellose) en 2012 et son incidence cumulée a été estimée à 14 pour 100 000 habitants (40).

Au Canada, la campylobactériose est la maladie entérique à déclaration obligatoire la plus fréquemment répertoriée. Son incidence annuelle cumulée est de 27 pour 100 000 habitants en 2013 (41). Pour la province du Québec, l'incidence annuelle cumulée de la campylobactériose humaine est en moyenne de 32 pour 100 000 habitants pour la période de 2010 à 2014 et de 29,91 pour 100 000 habitants en 2015 (4).

Réservoirs de Campylobacter

Les animaux domestiques et de la ferme notamment la volaille et les oiseaux sauvages sont les plus grands réservoirs de *Campylobacter* reconnus sur le plan mondial (37). Les oiseaux sauvages de diverses espèces sont aussi identifiés comme réservoirs naturels de *Campylobacter* et seraient responsables de la contamination des fermes d'élevage (42).

Plus de la moitié des troupeaux de vaches laitières seraient porteurs de *Campylobacter* au Canada (36). Au Québec, le principal réservoir animal de campylobactériose est la volaille (3) et 35% des troupeaux de volaille en fin d'élevage sont colonisés par *Campylobacter* avec une forte prédominance de *Campylobacter jejuni* (37). Viennent ensuite les bovins, les porcs, les animaux domestiques tels que les chiens, les chats et les animaux sauvages (3).

Mode de transmission

La campylobactériose se transmet des animaux à l'homme soit par contact direct, soit via les véhicules tels que l'eau ou les produits alimentaires animaux contaminés souvent par des matières fécales lors de l'élevage ou de l'abattage (36).

Le contact direct s'établit souvent avec les animaux domestiques ou les animaux de la ferme et serait responsable d'environ 10% des éclosions et de certains cas sporadiques de campylobactériose chez les humains (36). Gras et al. (43) ont établi des associations épidémiologiques entre des souches de *Campylobacter* provenant des chiens et leurs propriétaires atteints de campylobactériose. Potter et al. (44) ont montré que les travailleurs des fermes et des abattoirs ont environ sept fois plus de risque de contracter la campylobactériose que les autres professionnels.

Au niveau mondial plus de deux tiers des éclosions de campylobactériose seraient associées à la consommation de produits laitiers contaminés ou de produits de volailles (37).

Quant à l'eau, elle joue un rôle important dans la transmission de la campylobactériose. L'eau de consommation contaminée est la source la plus fréquente des éclosions à *Campylobacter* d'origine hydrique (36). En 2000, au Canada, *Campylobacter jejuni* a été (conjointement avec *Escherichia coli* O157 :H7) l'un des plus importants agents pathogènes impliqués dans la grande éclosion (2300 personnes atteintes dont sept décès) de gastroentérite d'origine hydrique survenue à la suite d'une contamination du système d'approvisionnement en eau de la ville de Walkerton par du fumier bovin des fermes environnantes (45). En 2010, le Danemark a connu la plus importante éclosion de campylobactériose impliquant 20 000 résidents ayant été exposés à une source d'eau contaminée dans la ville de Køge (46). En 2014, au Canada, Butler et al. ont observé qu'à part l'eau de consommation, les eaux environnementales telles que les lacs, les rivières, les marais et les bassins de rétention d'eau sont responsables de 9 % des cas sporadiques de campylobactériose (47).

Surveillance et prévention

La campylobactériose humaine fait l'objet d'une surveillance systématique dans plusieurs pays industrialisés. L'OMS travaille en partenariat avec le réseau mondial de surveillance des maladies d'origine animale, pour renforcer les capacités des laboratoires régionaux et nationaux pour la surveillance de cette infection. (28).

Au Canada, l'Agence de santé publique du Canada (ASPC) surveille de façon systématique les cas confirmés en laboratoire et les éclosions de campylobactériose depuis 1986, à partir du système des MADO (48). Elle coordonne également les interventions de contrôle et de prévention des éclosions, tandis que Santé Canada et l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) travaillent ensemble pour l'élaboration, la mise à jour et l'application des normes et des politiques de salubrité des aliments, afin de minimiser les risques de contamination des aliments et de propagation des maladies d'origine alimentaire et hydrique.

Au Québec, la surveillance et la prévention des cas humains sont assurées au sein de chacune des 18 régions sociosanitaires par les Directions régionales de santé publique (DRSP) (3) conjointement, dans certains cas, avec le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). La prévention passe par des mesures individuelles et collectives, insistant sur l'hygiène des mains, la salubrité et la bonne cuisson des aliments (49), ainsi que le développement des normes pour la qualité de l'eau et des mesures réglementaires dans le milieu agropastoral (3). La surveillance animale est assurée par le MAPAQ lequel transmet l'information pertinente pour la santé humaine au MSSS (3).

2.4 Généralités sur le climat : la température ambiante et les précipitations

Selon le Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat (GIEC), la vitesse moyenne du réchauffement global de la terre au cours des cinquante dernières années a considérablement augmenté. La température moyenne des océans aurait augmenté jusqu'à des profondeurs de 3000 mètres. Depuis 1978, l'étendue annuelle des glaciers arctiques diminue d'environ 2,7% (IC 95% 2,1-3,3) tous les dix ans (2). Les prévisions de l'OMM indiquent une augmentation des températures ambiantes ainsi que des événements climatiques extrêmes, à des degrés variables selon les régions et selon les saisons (30).

Les études de l'Institut de l'eau de l'Université de Caroline du Nord prévoient pour les pays industrialisés, une augmentation de l'intensité des précipitations qui pourraient engendrer une augmentation des risques d'inondation et de ruissellement d'eau ainsi qu'une plus grande circulation des déchets animaux et des particules dans les eaux de consommation (50).

A l'instar du reste du monde, les données climatiques canadiennes montrent des écarts par rapport aux valeurs de référence attendues. Les moyennes annuelles et saisonnières de température ambiante ont considérablement augmenté entre 1948 et 2014. Pour l'hiver, le

réchauffement est estimé à 3°C, tandis qu'il est d'environ 1,5°C en moyenne pour les autres saisons (7). Dans presque toutes les régions canadiennes, les précipitations ont augmenté et selon les prévisions, elles seront plus intenses et plus fréquentes (6). Le Québec connaît non seulement une augmentation de la température ambiante, mais également un accroissement du nombre de journées chaudes et des épisodes de chaleur extrême (51).

2.5 Entérozoonoses et climat à l'échelle mondiale et au Canada

Au niveau mondial

Plusieurs travaux réalisés dans différents pays rapportent une association entre les variations ou les changements climatiques et les infections entériques que ce soient des éclosions d'origine hydrique ou des cas isolés répertoriés pour la plupart par le système de surveillance local, national ou régional (6; 14-21; 22-27; 29; 36; 42-44; 46-47; 50; 52-58). La campylobactériose, la salmonellose, la cryptosporidiose, la giardiase, la shigellose et l'infection à *E. coli* O157: H7 étaient les infections entériques particulièrement étudiées.

La température ambiante, les précipitations et l'humidité étaient les indicateurs les plus utilisés et ceux qui ont permis d'étudier l'impact du climat sur les entérozoonoses (14-16; 19; 23; 25-27; 53; 55-58). Les données sur le climat provenaient des bases de données d'institutions nationales ou internationales. De nombreuses publications font état des associations entre différentes variables climatiques et l'incidence des entérozoonoses. En effet, Nygard et al. (2004) ont observé en Suisse, une faible association significative entre l'incidence cumulée annuelle de la campylobactériose humaine et la moyenne annuelle de la température ambiante. Le ratio des taux d'incidence (ou *Incidence rate ratio* IRR) est égal à 1,05 (IC95% 1,03-1,07) à partir d'un modèle de régression de Poisson (20). Au Danemark, Patrick et al. (2004) ont observé aussi avec un modèle de régression linéaire, une association entre l'incidence cumulée

hebdomadaire de la campylobactériose humaine et la moyenne de la température ambiante trois semaines au paravent (R^2 ajusté = 0.7439) (21). Pour établir une association entre les facteurs climatiques et l'incidence de la campylobactériose humaine, Kovats et al. (2005) ont réalisé une méta-analyse incluant les données de la République Tchèque, le Danemark, l'Angleterre, l'Espagne et la Suisse. Ils ont conçu un modèle de régression logistique intégrant la moyenne de la température ambiante sur plusieurs intervalles de semaines de décalage. L'augmentation de la température ambiante pour le décalage de 10 à 14 semaines était significative OR= 1.30 (IC 95%1.08-1.55) (18). Nichols *et al.* (2009) ont publié une étude de corrélation entre les éclosions d'entérozoonoses, et les facteurs environnementaux à savoir la température ambiante et le niveau de précipitation. Cette étude réalisée en Angleterre et au Pays de Galles sur la période de 1910 à 1999 a montré une association positive significative entre les éclosions à *Campylobacter*, *Cryptosporidium*, *Giardia* ou *Salmonella* d'origine hydrique et l'augmentation du l'augmentation du niveau cumulatif de précipitations dans les sept jours précédents ($p < 0,001$) (15). En Nouvelle-Zélande, Britton *et al.* (2010) ont exploré l'association entre le nombre de cas annuels de cryptosporidiose et les variations de la température ambiante et des précipitations pour la période de 1997 à 2006. Une faible association positive avec le niveau de précipitations annuelles reçues (IRR= 1,03 IC95%1,021-1,029), et une association négative avec la moyenne de température annuelle (IRR = 0.98, 95% CI 0.977, 0.986) a été observée à partir d'un modèle de régression binomiale négative (56).

Wilson *et al* (2011) ont réalisé une revue systématique de la littérature néo-zélandaise concernant les entérozoonoses et le climat, qui a permis de conclure à partir des travaux inclus, qu'il existe une association significative entre l'augmentation du nombre de cas déclarés de salmonellose et l'élévation des températures ambiantes (57). Par ailleurs, les travaux de Grjibovski *et al.* (2013) ont montré une association linéaire entre le nombre de cas mensuels de salmonellose confirmés au laboratoire et les moyennes mensuelles de température et de

précipitations en Russie en utilisant différents modèles de régression binomiale négative. Ainsi, selon eux, une élévation de 1 °C de la température moyenne mensuelle ou de 1mm des précipitations mensuelles étaient associées à une augmentation pouvant aller jusqu'à 2,32% (IC95% 0,38 - 4,27) du nombre de cas mensuel de salmonellose (53).

En Inde, une évaluation de la qualité de l'eau de la rivière Narmada, a été effectuée par Anjana, et al. (2014), couvrant la période de 2003 à 2008. L'équipe de recherche a réalisé des tests de corrélation de Pearson pour montrer qu'un changement significatif de la composition chimique notamment en oxygène dissout dans l'eau, serait en relation avec la crue des eaux et entraînerait l'émergence des entéropathogènes multi résistants tels que *Salmonella*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Shigella*, *Serratia*, *Aeromonas*, et *Vibrio* (52). Herrador *et al.* (2015) ont réalisé une revue systématique de la littérature sur les écrits ayant étudié l'association entre les infections entériques d'origine hydrique et les précipitations extrêmes ou la température ambiante. Vingt-quatre articles publiés entre 2001 et 2013, pour la plupart en Asie, en Europe et en Amérique ont été inclus (58). Parmi eux, une étude de séries temporelles réalisées en Angleterre sur une période de 10 ans, entre 1990-1999, a montré une association positive ($R^2 = 0,3329$; $P = 0,001$) entre l'incidence cumulée hebdomadaire de la campylobactériose et l'augmentation de la température ambiante hebdomadaire. (23).

Au Canada

Fleury *et al.* (2006) ont décrit à partir des modèles GAMs (*generalised additive model*), une association non linéaire entre l'incidence cumulée hebdomadaire de la campylobactériose et la moyenne de température hebdomadaire dans les provinces canadiennes d'Alberta et de Terre-Neuve-et-Labrador. Une augmentation de 1°C de la moyenne de température hebdomadaire entraîne une augmentation de 1,2% ($p = 0,005$) en Alberta et 4,5 % ($p = 0,005$) à Terre-Neuve-et-Labrador, de l'incidence cumulée hebdomadaire de la campylobactériose (19). Thomas *et al.*

(2006) ont observé par une analyse de corrélation stratifiée par saison, une association entre les événements climatiques extrêmes et les éclosions d'origine hydrique survenus au Canada entre 1975 et 2001. Ils ont conclu que chaque augmentation de 1 degré-jour de la température est associée à un risque relatif d'éclosion de 1,0007 (IC 95% = 1,0002 – 1,0012) et que chaque précipitation extrême (de quantité > 93^e percentile) augmente le risque relatif d'éclosion de 2,283 (IC95%= 1,216 – 4,285) (59). Harper *et al.* (2007) ont rapporté aussi une faible corrélation positive ($p < 0,05$) entre le niveau de précipitations des deux à quatre semaines précédentes et le nombre de consultations médicales pour gastroentérite dans le Nunatsiavut (l'actuelle province de Terre-Neuve-et-Labrador) (60).

Au Québec, Arsenault *et al.* (2011) ont observé, que le nombre de cas déclarés de campylobactériose était plus élevé durant la deuxième moitié de l'été soit juillet et août (61). Par ailleurs, Jokinen *et al.* (2012 et 2015) ont réalisé des études dans plusieurs régions agricoles de l'Alberta, montrant une corrélation entre la contamination par les entéropathogènes de l'eau de la rivière permettant d'irriguer les fermes, et les variations saisonnières du niveau de précipitations. En 2012, les chercheurs ont conclu que la présence de *Salmonella*, de *Campylobacter*, et de *Escherichia coli* O157: H7 dans l'eau d'irrigation des fermes desservies par la rivière Oldman était associée à la saison, au nombre d'unités de fumier animal et aux précipitations totales reçues, le jour de l'échantillonnage et trois jours avant l'échantillonnage ($p < 0,001$). En 2015, ils ont observé plus spécifiquement la distribution des sérotypes de *Salmonella enterica* à la surface des eaux traversant plusieurs régions agricoles du pays. Les échantillons d'eau ont été prélevés dans les rivières Sumas, Oldman, Nation Sud et Bras-d'Henri-et-Fourchette. Cette étude a permis d'identifier plus de 65 sérotypes différents dont environ 40% sont identiques à ceux retrouvés chez les cas humains de salmonellose (62;63). Valcour *et al.* (2016) ont décrit la variation des infections entériques en fonction des saisons au Nouveau Brunswick, de 1994 à 2002. La campylobactériose était l'infection entérique la plus

fréquente dans cette province et à l'instar des autres entérozoonoses, son incidence cumulée annuelle ne cesse d'augmenter. Ils ont observé également qu'il existe une variation saisonnière du nombre de cas de campylobactériose avec un pic pendant l'été (64).

Durant les vingt dernières années, les chercheurs se sont intéressés de plus en plus à l'association entre les infections entériques et le climat. Les travaux réalisés sont pour la plupart exploratoires. Les méthodes de régression linéaire et logistique ont été les plus utilisées. Très peu de travaux étaient réalisés avec des modèles prédictifs. Plusieurs études ont montré une association entre les infections entériques et les variations climatiques, cependant, plus de travaux sont encore nécessaires pour mieux préciser l'association entre les entérozoonoses et les variations de la température et des précipitations et construire des modèles de prédiction de l'évolution des entérozoonoses. Cela permettra d'identifier les indicateurs climatiques qui serviront à mieux orienter les actions de prévention.

CHAPITRE 3 : MÉTHODE

3.1 Nature et période de l'étude

Il s'agit d'une étude descriptive de l'association entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et les variations mensuelles de la température ambiante et du niveau de précipitations reçues dans trois régions sociosanitaires du Québec, au cours de la période allant du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2015.

3.2 Choix des régions sociosanitaires

La province du Québec est subdivisée en dix-huit régions sociosanitaires (RSS). Ces régions sociosanitaires ont été attribuées à une zone climatique selon la classification climatique de Litynski appliquée pour le Québec par le service de la cartographie écologique du Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques (65). En effet, la classification de Litynski pour le Québec utilise les données annuelles de la température ambiante, du niveau de précipitations et de la durée de la saison de croissance, et permet de distinguer quinze classes climatiques (Annexe 4). Ces quinze classes ont été regroupées en quatre zones climatiques (polaire, subpolaire froide, subpolaire, subpolaire douce et modérée) pour la réalisation de cette étude (Annexe 6). Les régions sociosanitaires de la Capitale-Nationale, de Mauricie-et-Centre-du-Québec et de Montréal (Annexe 5) ont été retenues pour représenter respectivement les zones subpolaires froides, les zones subpolaires et les zones subpolaires douces et modérées.

3.3 Collecte des données

3.3.1 Données des cas humains de campylobactériose

Les cas de campylobactériose humaine ont été recensés et regroupés par mois entre le 1^{er} janvier 2000 et le 31 décembre 2015 pour les trois régions sociosanitaires choisies, à partir de la base

de données des maladies à déclaration obligatoire du Québec. Il s'agit des déclarations faites par les laboratoires, suite à une requête faite par le médecin traitant du cas. Les données sont déclarées par événement pour chaque individu et saisies dans une base informatique dont l'accès nécessite l'approbation de chaque Direction régionale de santé publique (DRSP).

3.3.2 Données climatiques

Les données climatiques ont été collectées par le centre de recherche de l'unité des ressources forestières du service des Ressources naturelles du Canada, dans le cadre du projet de modélisation du climat à l'échelle régionale, nationale et internationale (66). Il s'agit des données historiques de 2000 à 2015, de température ambiante et de précipitations, observées à partir d'une moyenne de 300 stations météorologiques réparties dans les 18 régions sociosanitaires du Québec. Ces données ont été par la suite affinées par les RSS grâce à des algorithmes de lissage plan par plan tels que proposés par l'*Australian National University* (ANUSPLIN 4.4) (67).

3.3.3 Données géographiques

Pour déterminer la taille de la population par région sociosanitaire, les données des différents recensements de la population, effectués par Statistique Canada entre 2001 et 2016, ont été utilisées. Ces données étaient extraites pour chacune des régions sociosanitaires par le Bureau d'information et d'étude en santé des populations (BIESP) de l'INSPQ et ont servi au calcul des incidences cumulées mensuelles.

3.4 Variables étudiées

Les variables à l'étude pour chacune des trois RSS choisies sont les suivantes : l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine, la moyenne mensuelle du niveau de précipitations totales reçues et les températures ambiantes mensuelles maximales, minimales et moyennes.

L'**incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine** pour chaque région a été calculée en faisant le rapport entre le nombre de cas déclaré par mois et l'effectif de la population estimé pour ce mois. Elle est exprimée pour 100 000 habitants.

La **moyenne mensuelle du niveau de précipitations totales reçues** inclut la bruine, la bruine verglaçante, la pluie verglaçante, la grêle, les cristaux de glace, les granules de glace, la pluie, la neige, la neige roulée et la neige en grains accumulées sur un mois. Elle est exprimée en millimètre (mm).

La **température ambiante maximale mensuelle** représente la température la plus élevée enregistrée au cours du mois. Elle est exprimée en degré Celsius (°C).

La **température ambiante minimale mensuelle** représente la température la plus basse enregistrée au cours d'un mois. Elle est exprimée en degré Celsius (°C).

La **température moyenne mensuelle** a été calculée en faisant la moyenne des températures maximales et minimales mensuelles. A noter que les données de température journalière disponibles au moment de la conception de l'étude ne pouvaient pas permettre de calculer directement la moyenne mensuelle.

3.5 Méthode d'analyse

3.5.1 Outils d'analyse

Dans le cadre de cette étude, toutes les bases de données ont été préparées pour l'analyse, dans le tableur Microsoft Excel 2013. Les analyses statistiques ont été complétées avec les bibliothèques « *Forecast* », « *lmtest* » et « *TSA* » de la version 3.3.1 du logiciel RStudio^a.

3.5.2 Généralité sur les séries temporelles

Une série de données est dite temporelle ou chronologique lorsqu'elle est composée d'un nombre n d'observations numériques d'une variable x , dans un intervalle de temps équidistant (68). Elle est caractérisée en général par quatre composantes que sont : la tendance, le cycle, la saisonnalité et les fluctuations irrégulières. La tendance permet d'apprécier la croissance ou la décroissance de la moyenne de la série dans le temps. Le cycle représente la récurrence du phénomène étudié et se détermine au bout de plusieurs années. La saisonnalité représente la périodicité du phénomène au cours d'une année (69). Quant aux fluctuations irrégulières encore appelées résidus, elles représentent la partie des variations qui ne peuvent pas être expliquées par la tendance, le cycle ou la saisonnalité. Elles sont souvent causées par les événements exceptionnels ou imprévisibles.

Les séries temporelles sont étudiées principalement dans le but de faire des prévisions à court, moyen ou long terme ou d'établir des corrélations entre plusieurs variables qui évoluent en fonction du temps. Ainsi, les méthodes d'analyses de séries temporelles développées à la base pour les domaines de l'économétrie, ou de la météorologie sont de nos jours applicables à l'étude de la santé des populations. Il existe des méthodes paramétriques et des méthodes non

^a Version gratuite de RStudio disponible à <https://www.rstudio.com/>

paramétriques. La méthode de Box-Jenkins choisie pour cette analyse est l'une des méthodes paramétriques les plus utilisées.

3.5.3 La méthode ARIMA de Box-Jenkins

3.5.3.1 Description et typologie

Il s'agit d'un processus d'analyse de séries temporelles développé par Georges Box et Gwilym Jenkins en 1976, dont le but à l'instar des autres méthodes, est d'expliquer les variations observées dans une série de données, de faire des prévisions pour le futur ou d'étudier la relation entre plusieurs séries (69). Ainsi, à partir des observations d'un ou de plusieurs ensembles de données statistiques qui se répètent dans le temps à un intervalle régulier, par exemple annuel, trimestriel, mensuel ou journalier, on construit un modèle statistique permettant de quantifier la dépendance temporelle à l'intérieur d'une série ou de plusieurs séries. L'objectif est d'identifier un modèle statistique qui rend compte du processus stochastique qui a permis de générer les données à la base. Cette méthode offre l'avantage d'être simple, d'établir des liens entre plusieurs séries chronologiques et de faire des prévisions. Elle permet également de contrôler la saisonnalité et ne nécessite qu'un seul prérequis soit celui de la continuité des données dans le temps (68).

Les modèles ARIMA (*Auto-Regressive – Integrated – Moving Average*) de Box-Jenkins reposent sur trois principes fondamentaux (68) :

- Un processus autorégressif (AR) selon lequel chaque point peut être prédit par la somme pondérée d'un ensemble de points précédents, plus une erreur aléatoire.
- Un processus d'intégration (I) qui suppose que chaque point présente une différence constante avec le point précédent.

- Un processus de moyenne mobile (MA) selon lequel chaque point est fonction de la somme des erreurs entachant les points précédents et sa propre erreur.

A partir de ces principes fondamentaux, les modèles construits sont étiquetés ARIMA (p, d, q) ; p étant le nombre de termes autorégressifs, d le nombre de différences et q le nombre de moyennes mobiles.

Lorsque les données sont saisonnières, un modèle ARIMA saisonnier ou SARIMA (p, d, q) (P, D, Q) S est construit. Les paramètres p, d et q sont identiques à ceux du modèle de base tandis que les paramètres P, D, Q et S sont saisonniers et représentent respectivement le nombre de termes autorégressifs saisonniers, le nombre de différenciations saisonnières, le nombre de moyennes mobiles saisonnières et la saisonnalité.

Pour établir la corrélation entre plusieurs variables, la méthode de Box-Jenkins propose la fonction de corrélation croisée (ou *Cross Correlation Function CCF*) ou le modèle (S)ARIMAX (*Seasonal Auto-Regressive – Integrated – Moving Average with exogenous variables*). La fonction de corrélation croisée permet de combiner deux modèles de séries temporelles de fréquence similaire, afin de vérifier s'il existe une corrélation significative entre les deux séries. En cas de corrélation significative, le graphique de corrélation croisée et le coefficient de corrélation obtenus permettent de déterminer le sens et la magnitude de la corrélation. La méthode SARIMAX quant à elle, est une variante de la modélisation SARIMA de Box-Jenkins qui permet d'intégrer plusieurs variables afin d'apprécier leur effet dans le modèle. Les paramètres utilisés sont donc identiques à ceux du SARIMA (p, d, q, P, D, Q et S) à la seule différence que deux ou plusieurs co-variables sont intégrées dans le modèle.

3.5.3.2 Étapes de la modélisation

La méthode de Box-Jenkins suggère en général quatre étapes (69) : l'identification du modèle, l'estimation des paramètres, la validation de l'adéquation du modèle et les prévisions.

L'identification du modèle passe par la vérification de la stationnarité des données à partir de l'observation des graphiques de corrélogramme et le test de Dickey Fuller augmenté ou ADF (*Augmented Dickey-Fuller*). Le test de Dickey Fuller augmenté est un outil statistique utilisé pour détecter la présence d'une racine unitaire dans un processus autorégressif d'ordre p , qui permet de tester l'hypothèse nulle H_0 : le modèle a une racine unitaire et l'hypothèse alternative H_1 : le modèle n'a pas de racine unitaire. Lorsque la série initiale n'est pas stationnaire, une différenciation d'ordre d , ou une transformation logarithmique doivent être faites pour la rendre stationnaire. Le graphique de corrélogramme de la série initiale permet surtout de vérifier la saisonnalité. Lorsque la série initiale est saisonnière, une différenciation saisonnière d'ordre D doit être faite. A l'issue de cette étape, le chercheur détermine le type de modèle à construire (saisonnier ou non saisonnier).

L'estimation des différents paramètres p , q , P , et Q est réalisée à partir des graphiques d'autocorrélation (ACF) et d'autocorrélation partielle (PACF). Les autocorrélations partielles sont nulles au-delà de l'ordre p et les autocorrélations sont nulles au-delà de l'ordre q . Après avoir choisi les différents paramètres, plusieurs modèles sont élaborés par la méthode des moindres carrés ou la méthode du maximum de vraisemblance. Le modèle le plus vraisemblable est celui qui minimise l'un des critères suivants : le critère d'information d'Akaike (AIC), l'erreur absolue moyenne (MAE) ou l'erreur quadratique moyenne (MSE).

Les modèles retenus doivent être validés par l'absence d'autocorrélation des résidus. Le test de Box-Pierce ou Box-Ljung (H_0 : les résidus ne sont pas auto-corrélés) est l'outil le plus utilisé pour la vérification des résidus. L'histogramme de la distribution des résidus est également utilisé pour apprécier leur distribution.

Les modèles validés pourront par la suite être utilisés pour les prévisions. Le meilleur modèle est celui ayant le plus faible critère d'information d'Akaike (AIC) et dont les résidus sont normalement distribués et ne sont pas corrélés.

3.6 Considérations éthiques

Un fichier dépersonnalisé de la base de données des maladies à déclaration obligatoires (MADO) du Québec a été utilisé dans le cadre de ce travail, après les approbations du Comité d'éthique de la recherche en santé (CERES) de l'Université de Montréal, ainsi que des directions régionales de santé publique. Ces données ont ensuite été entreposées dans un répertoire confidentiel de l'INSPQ et traitées selon la Politique sur la protection et la sécurité de l'information (PO-04-2014) de l'INSPQ, afin d'assurer le respect des normes de confidentialité et de discrétion. L'analyse des données a été faite sur des informations agrégées par région sociosanitaire.

CHAPITRE 4 : MANUSCRIT

Rôle des co-auteurs

Les auteurs de ce manuscrit sont, dans l'ordre, Christiane Lawson, Kate Zinszer, Alejandra Irace-Cima et Julio C Soto. Je suis l'auteure principale de ce manuscrit et j'ai effectué la recension des écrits, les analyses statistiques et la rédaction du manuscrit avec le soutien de la co-auteure Kate Zinszer et sous la supervision de Alejandra Irace-Cima, ma co-directrice et de Julio C Soto, mon directeur. Tous les co-auteurs ont révisé et approuvé la version à être soumise éventuellement à la Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique (ELSEVIER) RESPE.

**Influence de la température ambiante et des précipitations sur l'incidence de la
campylobactériose humaine au Québec, Canada :
Une analyse de séries temporelles selon les modèles SARIMA et SARIMAX**

**Effect of ambient temperature and precipitations on human campylobacteriosis
incidence in Quebec, Canada:
An analysis of SARIMA and SARIMAX time-series models**

Christiane C. Lawson¹, Kate Zinszer^{1,2}, Alejandra Irace-Cima^{1,3}, Julio C. Soto^{1,3}

¹Département de médecine sociale et préventive, École de santé publique de l'Université de Montréal ²Institut de recherche en santé publique de l'Université de Montréal; ³Unité Surveillance, évaluation de risque et contrôle des maladies infectieuses, Direction des risques biologiques et de la santé au travail, Institut national de santé publique du Québec.

Adresse de correspondance

Dr Julio C. Soto M.D., PhD.
Unité Surveillance, prévention et contrôle des maladies infectieuses
Direction des risques biologiques et de la santé au travail
Institut National de la Santé Publique du Québec
190, boulevard Crémazie Est,
Montréal (Québec) H2P 1E2
Tél. : 514 864-1600, poste 3215
julio.soto@inspq.qc.ca

Titre courant : Campylobactériose et climat au Québec

4508 mots - 2 tableaux- 1 figure - 40 références

Abstract

Background: Climate is increasingly associated to the emergence or resurgence of zoonoses. Campylobacteriosis is a dominant zoonotic infection in Canada, resulting in 27 cases per 100,000 persons per year. The main objective of this study was to examine the relationship between monthly maximum ambient temperature and total precipitation volume with campylobacteriosis cumulative monthly incidence in three Quebec health regions, which have different climatic conditions: *Montréal*, *Mauricie-et-Centre-du-Québec* and *Capitale-Nationale*.

Methods: We conducted a time series analysis using SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) and SARIMAX (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous variables) models, based upon data from 2000 to 2015 in each region.

Results: For the three health regions, the cumulative monthly incidence of campylobacteriosis followed seasonal trend with a peak in July and August. The average cumulative monthly incidence per 100,000 persons for *Montréal*, *Mauricie-et-Centre-du-Québec* and for *Capitale-Nationale* was respectively, 1.98 (95% CI 1.89-2.07), 3.90 (95% CI 3.70-4.10) and 3.90 (95% CI 3.69-4.11). The cross-correlation with temperature was significantly and positively correlated with campylobacteriosis cumulative monthly incidence at zero lag for both *Montréal* and *Mauricie-et-Centre-du-Québec*. With precipitation, the correlation was significant and positive at lag 12 only for *Mauricie-et-Centre-du-Québec*. The SARIMAX (7,0,2) (1,0,0) and (2,0,2) (1,1,1) models showed a positive correlation with the temperature ($p < 0.0001$) and a negative correlation with total precipitation ($p = 0.0004$) for *Montréal*. For *Mauricie-et-Centre-du-Québec* region, a positive correlation was found only with temperature ($p = 0.0079$).

Conclusion: Changes in ambient temperature and total precipitation were correlated to the cumulative monthly incidence of human campylobacteriosis in the three Quebec regions studied. However, campylobacteriosis remains to be studied. The next steps could include

examining the incidence with other climatic and socio-demographic factors, in other health regions and using predictive SARIMAX modeling with a longer observation period.

Keywords: Human Campylobacteriosis. Climatic factors. Time-series analysis.

Word count: 292 words

Résumé

Position du problème : Le climat est de plus en plus associé à l'émergence ou la résurgence des zoonoses. La campylobactériose est la zoonose la plus déclarée au Canada avec une incidence cumulée annuelle de 27 cas pour 100 000 habitants. L'objectif principal de cette étude était d'analyser la relation entre la température ambiante maximale, les précipitations totales et l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans trois régions sociosanitaires du Québec ayant des conditions climatiques différentes: Montréal, Mauricie-et-Centre-du-Québec et Capitale-Nationale.

Méthodes : Une analyse de séries temporelles spécifiquement selon les modèles SARIMA (*Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average*) et SARIMAX (*Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous variables*) a été réalisée sur les données de 2000 à 2015 dans chaque région.

Résultats : Pour les trois régions, l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose suivait une tendance saisonnière avec un pic maximal entre juillet et août. Elle était en moyenne, par 100 000 habitants, de 1,98 (IC 95% 1,89-2,07) pour Montréal; 3,90 (IC 95% 3,70-4,10) pour Mauricie-et-Centre-du-Québec et 3,90 (IC 95% 3,69-4,11) pour la Capitale-Nationale. La corrélation croisée avec la température était significative et positive sur le décalage 0 pour les régions de Montréal et de Mauricie-et-Centre-du-Québec. Avec les précipitations, elle était significative et positive pour un décalage de 12 mois (*lag 12*) pour Mauricie-et-Centre du-Québec. Les modèles SARIMAX (7,0,2) (1,0,0) et (2,0,2) (1,1,1) ont permis d'observer respectivement pour la région de Montréal, une corrélation positive avec la température ($p < 0,0001$) et les précipitations totales ($p = 0,0004$) et pour la région de Mauricie-et-Centre-du-Québec une corrélation positive avec la température ($p = 0,0079$).

Conclusion : Les variations de la température et des précipitations totales ont été associées avec l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans les trois régions du

Québec étudiées. Cependant, il reste beaucoup à étudier sur l'incidence de la campylobactériose. Les prochaines étapes pourraient inclure l'étude de l'incidence avec d'autres facteurs climatiques et sociodémographiques, dans d'autres régions et avec l'élaboration des modèles SARIMAX prédictifs avec une période d'observation plus longue.

Mots-clés : Campylobactériose humaine – Facteurs climatiques – Analyse de séries temporelles

Nombre de mots : 343 mots

1. Introduction

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la campylobactériose est la plus fréquente cause de gastroentérite dans les pays industrialisés [1]. Comme toutes les zoonoses, son incidence est influencée par plusieurs facteurs dont les conditions climatiques [2]. L'association entre les zoonoses et certains facteurs climatiques tels que la température et les précipitations est un sujet d'actualité. Lors de la dernière décennie, plusieurs chercheurs ont décrit une association entre les variations de température et de précipitations et les maladies infectieuses entériques notamment des entérozoonoses [2-14]. Les données climatiques canadiennes indiquent que le climat change et les événements climatiques extrêmes se sont multipliés au cours des dernières années [15]. Au Québec, certains pathogènes notamment *Salmonella*, *Campylobacter* et *Escherichia coli* ont été identifiés comme de plus en plus présents dans les eaux d'irrigation constituant une source de contamination des aliments [7]. Par ailleurs, durant les dernières années, la campylobactériose a été la plus fréquente des entérozoonoses déclarées au registre québécois des Maladies à déclaration obligatoire (MADO) [16]. On se demande alors, dans quelle mesure les tendances évolutives de cette infection peuvent être expliquées par des paramètres climatiques tels que la température ambiante et le niveau de précipitations reçues et comment l'incidence cumulée de la campylobactériose humaine peut être prédite.

Les principaux objectifs de cette étude étaient : 1) de décrire l'évolution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans trois régions sociosanitaires du Québec de 2000 à 2015, 2) d'analyser l'association entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et la température ambiante mensuelle ainsi que les précipitations totales mensuelles, pour la même période d'étude dans ces trois régions sociosanitaires et 3) d'identifier le meilleur modèle prédictif de l'évolution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine au Québec.

2. Matériels et méthodes

Lieu de l'étude : L'étude a été réalisée au Québec, la plus vaste province canadienne avec une superficie de 1,7 millions km², et qui compte plus de 8 millions d'habitants [17]. Le Québec est traversé par le fleuve Saint Laurent qui draine les Grands Lacs jusqu'à l'océan Atlantique, permettant ainsi de distinguer quatre régions de climat variable, lesquelles sont subdivisées en quinze classes, par le service de la cartographie écologique du Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques du Québec [18]. Cette subdivision, adaptée à la classification internationale de Litynski, offre l'avantage d'apprécier les zones climatiques selon la température, les niveaux de précipitations reçues et la durée de la saison de croissance des végétaux. Ainsi, on distingue les zones : polaire, subpolaire froide, subpolaire, subpolaire douce et modérée. En ce qui a trait au système de santé et des services sociaux, le territoire québécois est divisé en dix-huit régions sociosanitaires, chacune avec une direction régionale de santé publique (DRSP), instance responsable entre autres de la surveillance des MADO de nature infectieuse diagnostiquées par les médecins et / ou par les laboratoires.

Collecte des données bioclimatiques: La base de données MADO du Québec a servi à recenser les cas humains de campylobactériose déclarés au Québec entre le 1^{er} janvier 2000 et le 31 décembre 2015. Conjointement, les données des recensements de la population (2001 – 2016) menés par Statistique Canada et extraites pour chacune des régions sociosanitaires par le Bureau d'information et d'étude en santé des populations (BIESP) de l'Institut national de santé publique du Québec, ont servi au calcul des incidences cumulées mensuelles exprimées par 100 000 habitants. Les données climatiques proviennent du centre de recherche de l'unité des ressources forestières du service des Ressources naturelles Canada, lequel les a collectées dans le cadre du projet de modélisation du climat à l'échelle régionale, nationale et internationale [19]. Il s'agit de données historiques observées dans un rayon de deux kilomètres, à partir d'une

moyenne de 300 stations météorologiques réparties dans les 18 régions sociosanitaires du Québec et affinées par les algorithmes de lissage plan par plan tels que proposés par l'*Australian National University* (ANUSPLIN 4.4) [20]. Les moyennes mensuelles de température maximale et minimale ainsi que la moyenne mensuelle de précipitations totales (incluant neige et pluie totale) sont les variables climatiques retenues pour cette étude et ont été extraites à l'aide du logiciel QGIS 2.18. Les températures sont exprimées en Degré Celsius (°C) et les précipitations totales en millimètre (mm).

Analyse statistique : Plusieurs variables ont été étudiées, notamment l'incidence cumulée mensuelle de campylobactériose humaine, les températures mensuelles maximales, minimales et moyennes (calculées à partir de la minimale et de la maximale) et la moyenne mensuelle de précipitations totales. Les 18 RSS du Québec ont été attribuées à une zone climatique selon la classification climatique de Litynski. Les régions sociosanitaires de la Capitale-Nationale, de Mauricie-et-Centre-du-Québec et de Montréal ont été retenues car elles représentaient respectivement les zones subpolaires froides, subpolaires et subpolaires douces à modérées et disposaient également de données complètes et ininterrompues sur toute la période d'étude. Pour chaque région sociosanitaire et pour toutes les variables à l'étude, la moyenne sur les 192 mois d'observation avec les intervalles de confiance à 95% ont été calculés à partir de Microsoft Excel 2013 en considérant un risque alpha de 5%, une taille de population égale à 192 et un écart-type de 1.

Pour l'analyse de séries temporelles, les modèles SARIMA (*Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average*) et SARIMAX (*Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with exogenous variables*) de Box-Jenkins [21] ont été utilisés à partir des bibliothèques « *Forecast* », « *lmtest* » et « *TSA* » de la version 3.3.1 du logiciel R. En raison d'une forte corrélation entre les trois valeurs de température (minimale, moyenne, maximale) disponibles, pour la modélisation seulement la température maximale et les précipitations totales ont été

retenues. Pour chaque région sociosanitaire, les modèles SARIMA ont été construits sur les données de 2000 à 2015 selon les étapes suivantes : conversion de la variable incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine en séries temporelles, vérification de la stationnarité, identification des paramètres du modèle, choix du meilleur modèle, analyse des résidus et vérification de la vraisemblance du modèle. L'identification d'un modèle SARIMA pour les variables climatiques (température maximale mensuelle et précipitations totales mensuelles) a été faite selon les mêmes étapes que précédemment. Pour déterminer la magnitude de la corrélation entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose et les variables climatiques, la fonction de corrélation croisée (ou *Cross Correlation Function CCF*) était utilisée avec et sans « *prewhitening* ». Le test de Dickey-Fuller augmenté était utilisé pour vérifier la stationnarité. Lorsque l'hypothèse nulle de non-stationnarité des données était rejetée, on pouvait déduire que les données étaient stationnaires. En cas de non-stationnarité ou d'observation d'une tendance saisonnière, une différenciation était réalisée. Les paramètres (p, d, q) (P, D, Q,) et S ont été identifiés à partir de la représentation graphique des fonctions d'autocorrélation (ACF) et d'autocorrélation partielle (PACF). Un modèle SARIMAX était construit par la suite, en intégrant les deux variables climatiques. Le modèle retenu était celui ayant le plus faible critère d'information d'Akaike (AIC) et dont les résidus étaient normalement distribués et n'étaient pas corrélés. La vérification de l'absence de corrélation entre les résidus a été faite par le test de Box-Ljung (H_0 : les résidus ne sont pas auto-corrélés).

3. Résultats

Pour chacune des trois régions sociosanitaires de notre étude, l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et les moyennes mensuelles de la température ambiante maximale et du niveau de précipitations totales ont été observées sur 192 mois (2000-2015). Pendant cette période, l'incidence cumulée mensuelle moyenne de la campylobactériose

humaine était de 3,90 pour 100 000 habitants dans la région de Mauricie-et-Centre-du-Québec (IC 95% 3,69-4,11) et aussi dans la région de la Capitale-Nationale (IC 95% 3,70-4,10). La moyenne observée dans la région de Montréal était de 1,98 pour 100 000 habitants (IC 95% 1,89-2,07), du même ordre de grandeur que la moitié de celle observée dans les deux autres régions. Dans les trois régions sociosanitaires étudiées, l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose suivait une tendance saisonnière (Figures 1A, 1C et 1E). Les Figures 1B, 1D et 1F montrent que l'incidence cumulée mensuelle augmentait progressivement au printemps et atteignait son maximum à l'été durant les mois de juillet (correspondant au 7^e mois sur la courbe) et août (correspondant au 8^e mois sur la courbe).

Concernant l'observation des températures, la moyenne des températures maximales pour les 192 mois à Montréal était de 11,88°C (IC 95% 10,26-13,50), tandis qu'elle était de 8,54°C dans la région de Mauricie-et-Centre-du-Québec (IC 95% 6,89-10,19) et de 7,57 °C dans la région de la Capitale-Nationale (IC 95% 6,00-9,14).

Pour les précipitations totales reçues, leur moyenne pour la même période était moins élevée à Montréal avec 83,36 mm (IC 95% 78,80-87,92), suivie par la Mauricie-et-Centre-du-Québec avec 84,81mm (IC 95% 80,39-89,23) et la Capitale-Nationale avec 102,44mm (IC 95% 97,21-107,67).

Les résultats de la corrélation croisée entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose et chacune des variables climatiques (Tableau I) montrent que dans l'ensemble, les corrélations sont faibles. Elles sont positives pour les régions de Montréal et de Mauricie-et-Centre-du-Québec et négative pour la Capitale Nationale. Plus précisément une faible association significative avec la température maximale sans décalage (*lag* 0), dans les régions de Montréal et de Mauricie-et-Centre-du-Québec ($p < 0,05$) a été observée. La corrélation avec le niveau de précipitations totales était significative et positive pour la région de Mauricie-et-Centre-du-Québec ($p < 0,05$) avec un décalage de douze mois (*lag* 12). Pour la

région de la Capitale-Nationale, une corrélation négative avec la température maximale était statistiquement significative avec un décalage de trois mois (lag 3), mais elle reste faible.

Les modèles SARIMAX se sont avérés être les meilleurs modèles pour apprécier la corrélation entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactérose humaine et les variables climatiques. Comme l'illustre le [Tableau II](#), il existe une corrélation positive entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactérose humaine et la température maximale qui est statistiquement significative dans les régions de Montréal et de Mauricie-et-Centre-du-Québec. Ainsi, lorsque la température maximale augmente d'un degré Celsius au cours d'un mois, l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactérose augmente de 0,0339 pour 100 000 habitants au cours du même mois dans la région de Montréal et de 0,0279 pour 100 000 habitants dans celle de Mauricie-et-Centre-du-Québec. La corrélation avec le niveau de précipitations totales est négative et n'est significative que pour la région de Montréal où lorsque le niveau de précipitations totales augmente d'un millimètre au cours d'un mois, l'incidence cumulée mensuelle diminue de 0,0017 pour 100 000 habitants.

3. Discussion

Cette étude a permis, comme prévu dans les objectifs, de : 1) décrire l'évolution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactérose humaine dans trois régions sociosanitaires du Québec de 2000 à 2015, 2) d'analyser l'association entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactérose humaine et la température ambiante mensuelle ainsi que les précipitations totales mensuelles, pour la même période d'étude dans ces trois régions sociosanitaires et 3) d'identifier le meilleur modèle prédictif de l'évolution de l'incidence mensuelle cumulée de la campylobactérose humaine au Québec.

Incidence de la campylobactériose humaine

Les résultats montrent une tendance saisonnière de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine, avec un pic d'augmentation entre les mois de juillet et août dans les trois régions sociosanitaires étudiées. Ce phénomène a déjà été décrit dans les études similaires réalisées sur les entérozoonoses en général. En 2012, Lal et al. [22] l'ont mis en évidence dans une revue systématique des études sur la saisonnalité dans les zoonoses humaines entériques. Pour la campylobactériose, les chercheurs ont conclu que l'indice mensuel global de saisonnalité atteint son maximum en été, entre juillet et août pour les régions de l'Amérique du Nord, de l'Europe et du Royaume Uni. Après un ajustement pour les saisons de l'hémisphère nord, ils ont observé deux pics saisonniers, le premier en mai et le deuxième en septembre. La saisonnalité de la campylobactériose telle qu'observée avec un pic entre les mois de juillet et août a été confirmée également en Nouvelle Zélande par Lal et al. 2013 [8] qui ont vérifié l'association entre les variations climatiques régionales et l'incidence cumulée mensuelle des maladies entériques telles que la campylobactériose, la salmonellose, la cryptosporidiose et la giardiase, à partir d'une analyse de séries temporelles selon le modèle SARIMA. Aux États-Unis, le même constat a été fait par Weisent et al. 2014 [23] lors d'une analyse de séries temporelles par la méthode ARIMA où les chercheurs ont étudié l'importance des facteurs climatiques dans les prévisions de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans l'état de Géorgie. Herrardor et al. 2015 [24] ont observé également la tendance saisonnière de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose lors de la revue systématique des travaux ayant vérifié l'association entre les maladies infectieuses d'origine hydrique et les précipitations extrêmes ainsi que la température ambiante. Au Québec, l'étude réalisée récemment par Bekal et al. 2017 [25] a documenté la même tendance saisonnière pour les cas de campylobactériose avec un pic en juillet et août.

Association de l'incidence cumulée de la campylobactériose humaine avec la température ambiante maximale et les précipitations totales

Dans les régions sociosanitaires de Montréal et de Mauricie-et-Centre-du-Québec, les résultats de la corrélation croisée montrent qu'il existe une faible association positive significative entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et la température maximale mensuelle sans décalage (*lag* 0). Ainsi, une augmentation de la température maximale mensuelle entraîne une augmentation de l'incidence cumulée mensuelle de campylobactériose humaine au cours du même mois. Dans ces régions, l'analyse SARIMAX a montré également une corrélation positive avec la température maximale.

Ces résultats sont semblables à ceux décrits dans plusieurs études antérieures. Nygard et al. [26] et Patrick et al. [27] ont décrit en 2004, respectivement en Suisse et au Danemark, une corrélation positive entre la température moyenne hebdomadaire et l'incidence cumulée hebdomadaire de la campylobactériose. Au Danemark, le décalage de 4 semaines était statistiquement significatif ($p < 0,005$). Kovats et al. en 2005 [28] ont observé la même corrélation à partir d'une étude internationale sur l'association entre les variations climatiques et l'infection à *Campylobacter*, conduite en Europe, au Canada, en Australie et en Nouvelle Zélande. À partir d'un modèle de régression logistique, les chercheurs ont testé différents intervalles de semaines de décalage des variations de la température ambiante par rapport à l'augmentation de l'incidence hebdomadaire de la campylobactériose. Le décalage de 10 à 14 semaines était statistiquement significatif OR = 1,30 (IC95% 1,08-1,55). Pour leur part, Fleury et al. 2006 [29] ont décrit une association similaire entre l'incidence hebdomadaire de la campylobactériose et la moyenne de température hebdomadaire dans les provinces canadiennes d'Alberta et de Terre-Neuve-et-Labrador. Weisent et al. 2014 [23] ont montré également qu'il existe une corrélation positive entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose

humaine et la température moyenne mensuelle, sans décalage (*lag 0*) et avec un décalage de six (*lag 6*) ou de douze mois (*lag 12*), dans l'état de Georgia aux États-Unis.

Cette association avec la température est variable d'une région à l'autre (Lal et al. 2012 [22]) et pourrait s'expliquer par divers phénomènes. Selon Sinton et al. 2007 [30], en Nouvelle Zélande, l'élévation de la température ambiante est associée au risque de contamination des eaux et des aliments par les matières fécales de réservoirs bovins de la campylobactériose et influence fortement la survie de *Campylobacter jejuni* dans l'environnement. Au Danemark, Patrick et al. [27] ont observé une association entre la température et la contamination des oiseaux sauvages, des rongeurs et des mouches qui sont des réservoirs de *Campylobacter spp.* De plus, l'élévation de la température entraîne un changement du mode de vie des humains qui s'exposent plus aux produits de consommation contaminés, favorisant ainsi la chaîne de transmission [31; 32].

Greer et al. 2008 [33] ont également souligné l'association entre les voyages à l'étranger et les pics estivaux de la campylobactériose et de la salmonellose en Europe et au Royaume-Uni pour expliquer en partie cette corrélation ainsi que le pic saisonnier en été.

Dans notre étude, la corrélation observée seulement sans décalage (sur le *lag 0*) pourrait s'expliquer par la sous-déclaration des cas. En effet, il y aurait 23 à 49 fois plus de cas réels que de cas rapportés de campylobactériose au Canada (Thomas et al. 2013 [34]) tandis qu'aux États-Unis, les cas réels seraient 34 fois plus élevés que les cas déclarés (Samuel et al. 2004 [35]).

Dans la région sociosanitaire de la Capitale-Nationale, la corrélation avec la température n'est pas statistiquement significative dans le modèle SARIMAX, mais on observe une relation inverse avec un décalage de trois mois entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose et la température maximale dans la corrélation croisée. Cela suggère que lorsque la température augmente, l'incidence diminue. Cette situation a été précédemment observée par Bekal et al. 2017 [25] pour la même période, dans la même région sociosanitaire,

à partir d'un modèle de régression binomiale négative. Ces résultats indiquent que la température influence l'incidence de la campylobactériose dans cette région différemment des deux autres régions étudiées. Cette situation pourrait être attribuée à la différence du climat. La région de la Capitale-Nationale faisant partie de la zone climatique subpolaire froide, les moyennes de températures enregistrées ($7,57 \pm 1,57$ °C) et la durée de la saison de croissance des végétaux (120 à 149 jours) sont plus faibles que celles des régions de Montréal ($11,88 \pm 1,62$ °C) et de Mauricie-et-Centre-du-Québec ($8,54 \pm 1,65$ °C) qui enregistrent des températures plus chaudes et une saison de croissance modérée à longue (150 à 209 jours). Cette différence entre les conditions météorologiques pourrait avoir un impact sur les réservoirs animaux locaux ou sur les procédures de transformation des aliments (Bi et al. 2008 [36]), cependant elle n'est pas suffisante pour expliquer la relation inverse observée. D'autres facteurs plus importants tels que le relief, le nombre de cours d'eau et de fermes animales pourraient avoir plus d'impact.

Le niveau moyen de précipitations totales mensuelles reçues au cours d'un mois présente une association négative statistiquement significative avec l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose dans la région de Montréal. Une association positive statistiquement significative avec les précipitations a été également observée dans la RSS Mauricie-et-Centre-du-Québec uniquement par la corrélation croisée, avec un décalage de douze mois (*lag 12*). Au Danemark, Patrick et al. 2004 [27] ont observé que le niveau de précipitations reçues au cours d'un mois pourrait expliquer 6% des variations de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose. Weisent et al. 2014 [26], dans l'état de Georgia aux États-Unis, ont observé également une association positive avec les précipitations, mais avec un décalage de 6 mois (*lag 6*). Aucune association statistiquement significative avec les précipitations n'a été retrouvée dans les deux autres régions étudiées, ce qui coïncide avec les résultats publiés par Louis et al. 2005 [37], White et al. 2009 [38] et Lal et al. 2013 [8], lesquels n'ont trouvé aucune association entre les précipitations et l'incidence de la campylobactériose respectivement en

Angleterre, à Philadelphie et en Nouvelle-Zélande. Selon les études antérieures, la corrélation entre la campylobactériose et le niveau de précipitations est très variable d'une région à l'autre (Herrador et al. 2015 [24]). Dans notre étude, l'utilisation des précipitations totales, incluant la neige et la pluie totale, pourrait avoir sous-estimé l'effet des précipitations pluviales dans l'association. D'autres facteurs non climatiques pourraient expliquer les tendances saisonnières et ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Le troisième objectif qui était d'identifier le meilleur modèle prédictif de l'évolution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine au Québec a finalement fait l'objet d'une étude exploratoire dont les résultats seront présentés et commentés dans la section réservée à la discussion générale du mémoire.

Limites de l'étude

A l'instar de toutes les zoonoses, l'étude de l'incidence cumulée de la campylobactériose humaine présente la limite principale du sous-diagnostic des cas. En général, 4 à 17 % seulement des personnes atteintes consulteraient un médecin (de Wit et al. 2001 [39]) et la sensibilité des méthodes de laboratoire pour détecter *Campylobacter*, au Canada, serait entre 73 et 89 % (Gosselin-Théberge et al. 2015 [40]). Cette limite pourrait altérer la qualité des modèles ARIMA ainsi que le sens et la force des associations, si la proportion des cas déclarés n'est pas constante dans le temps. Les analyses de séries temporelles réalisées sur des données hebdomadaires auraient probablement permis de mieux apprécier la corrélation avec les variables climatiques. L'absence de disponibilité des données climatiques hebdomadaires précises au moment de la conception de cette étude a conduit au choix de l'utilisation des données mensuelles. Notons que les facteurs de risque comme l'âge, le sexe, l'immunité et le niveau socio-économique n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

4. Conclusion

La transmission des entérozoonoses est un phénomène complexe et multifactoriel auquel s'ajoutent les facteurs climatiques qui influencent les tendances évolutives de la campylobactériose humaine au Québec. La température maximale et les précipitations totales mensuelles sont faiblement associées à l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose dans les régions sociosanitaires de Montréal et de Mauricie-et-Centre-du-Québec selon les modèles SARIMA et SARIMAX de Box-Jenkins. Cependant, une étude plus approfondie considérant une plus longue période, incluant d'autres facteurs climatiques tels que l'humidité et la durée de la saison de croissance des végétaux et identifiant des modèles de séries temporelles pouvant prédire l'évolution de l'incidence permettrait de mieux expliquer les variations de l'incidence de la campylobactériose et de faire de projections.

Cette étude pourrait s'inscrire dans le cadre des réalisations du plan d'action québécois 2013-2020 – Volet santé sur les changements climatiques qui soutient tous les projets de recherche visant à approfondir les connaissances sur les sujets mettant en lien la santé et le climat. Les résultats contribueront également à l'amélioration des interventions en prévention et en protection de la santé des populations québécoises.

Tableaux et graphiques

Tableau I: Corrélation croisée entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et les variables climatiques : température maximale mensuelle et précipitations totales mensuelles, dans les trois régions sociosanitaires

	Température maximale			Précipitations totales		
	Lag (mois)	Corrélation	Valeur p	Lag (mois)	Corrélation	Valeur p
Montréal	0	0,176	p<0,05	9	0,140	Non sig.
Mauricie-et-Centre-du-Québec	0	0,253	p<0,05	12	0,158	p<0,05
Capitale-Nationale	3	-0,171	p<0,05	3	-0,144	Non sig.

Non Sig.=non statistiquement significatif; lag = décalage.

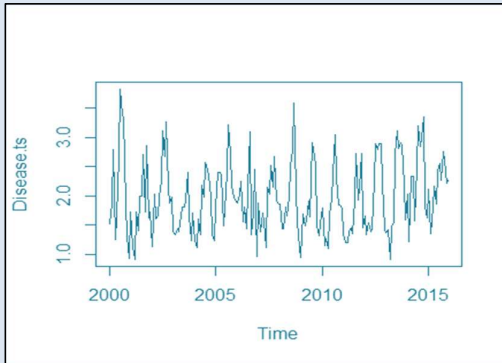
Tableau II: Résultats de l'analyse de séries temporelles SARIMAX pour les trois régions sociosanitaires

Modèles SARIMAX	Co-variables	Coefficient	IC (95%)	Valeur p
Montréal				
(7,0,2)(1,0,0)	Température maximale	0,0339	0,0247 à 0,0432	p<0,0001*
	Précipitations totales	-0,0017	-0,0027 à -0,0007	0,0004*
Mauricie-et-Centre-du-Québec				
(2,0,2)(1,1,1)	Température maximale	0,0279	0,0073 à 0,0433	0,0079*
	Précipitations totales	-0,0009	-0,0028 à -0,0008	0,2894
Capitale-Nationale				
(1,0,1)(2,1,1)	Température maximale	0,0147	-0,0689 à 0,0982	0,7304
	Précipitations totales	-0,0015	-0,0064 à 0,0034	0,5563

Signification statistique ** p<0.05; IC = intervalle de confiance.

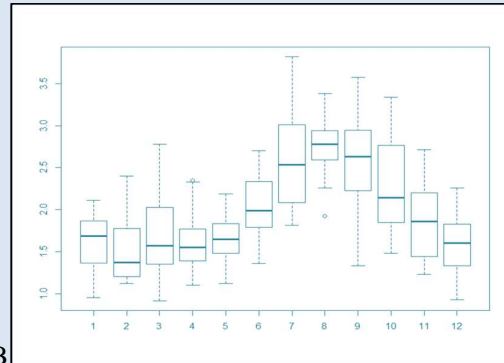
Montréal

Time series plot



A

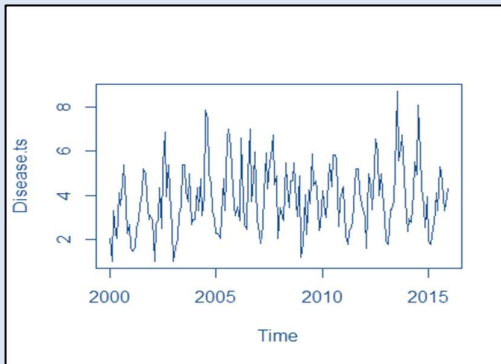
Boxplot



B

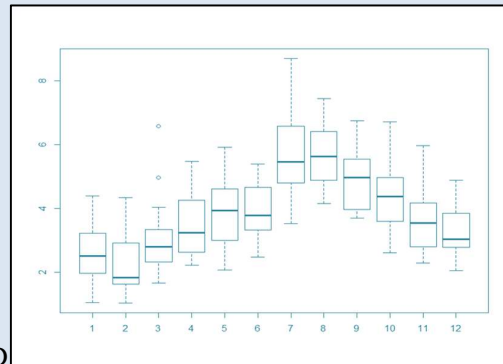
Mauricie-et-Centre-du-Québec

Time series plot



C

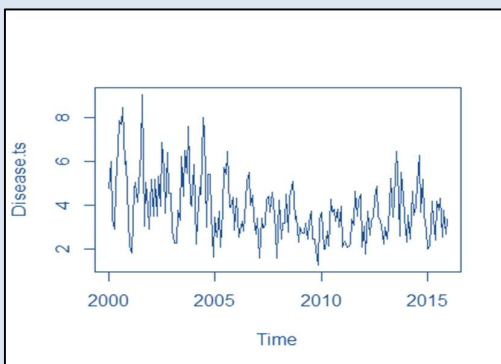
Boxplot



D

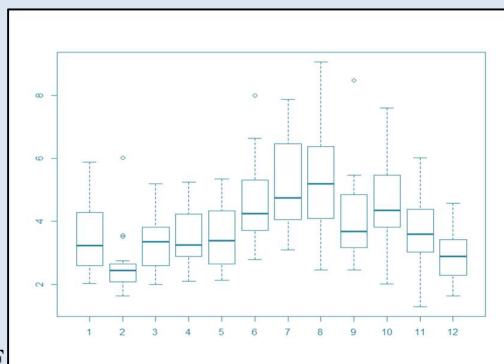
Capitale-Nationale

Time series plot



E

Boxplot



F

Figure 1 Tendances évolutives et distribution selon les mois, de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine, de 2000 à 2015, pour les régions sociosanitaires de Montréal (A; B), de Mauricie-et-Centre-du-Québec (C;D) et de la Capitale-Nationale (E;F).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Institut national de la santé publique du Québec (INSPQ), toutes les Directions régionales de santé publique (DRSP) du Québec et le service des Ressources naturelles du Canada pour leur soutien à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à Mme Sadjia Bekal, PhD, M Daniel Mckenney, PhD, Dr Patricia Turgeon, D.M.V., PhD, M Philippe Berthiaume, B. Sc., M. Sc., PhD, Mme Nathalie Gravel, analyste en géomatique et M Matthieu Tandonnet, analyste en géomatique pour leurs apports et commentaires.

CONFLITS D'INTERET : Aucun conflit d'intérêt n'a été déclaré.

LEGENDE DE LA FIGURE 1

Figure 1 : Les graphiques nommés « *Time-series plot* » présentent les tendances évolutives de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine sur 16 années (2000 à 2015), pour les régions sociosanitaires de Montréal (A), de Mauricie-et-Centre-du-Québec (C) et de la Capitale-Nationale (E). Les figures nommées « *Boxplot* » présentent la distribution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine pour les douze mois de l'année, sur les seize années d'étude, pour les régions sociosanitaires de Montréal (B), de Mauricie-et-Centre-du-Québec (D) et de la Capitale-Nationale (F). Signification des échelles pour les figures B, D et F : 1=janvier; 2=février; 3=mars; 4=avril; 5=mai; 6=juin; 7=juillet; 8=août; 9=septembre; 10=octobre; 11=novembre; 12=décembre.

REFERENCES

1. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Organization for Animals Health. (2013). The global view of campylobacteriosis: report of an expert consultation, Utrecht, Netherlands, 9-11 July 2012. World Health Organization 57p. Repéré à l'URL suivant: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/80751/1/9789241564601eng.pdf> Consulté en février 2017.
2. Desjarlais C et al. (2010). Savoir s'adapter aux changements climatiques. OURANOS, Montréal. 124 p. Disponibles à l'adresse URL : http://www.ouranos.ca/media/nouvelle/document/53_ssc_21_06_lr.pdf Consultée en août 2018.
3. Michel P, Bigras-Poulin M, Ravel A, Berthiaume P. (2004, juillet). Modélisation, indices et déterminants agroenvironnementaux des zoonoses. Communication présentée au 23^{ème} Congrès mondial de buiatrie, Québec Canada.
4. Anjana S, Kumar S, Lokesh K, Chandan BR, Varsha, S. (2014). Evaluation of Water Quality of River Narmada and Its Correlation with Occurrence of Enteropathogens. J Environ Sci Eng, 56, 1, 45-52.
5. Grjibovski AM, Bushueva V, Boltenkov VP, Buzinov RV, Degteva GN, Yurasova ED, Nurse J. (2013). Climate variations and salmonellosis in northwest Russia: a time-series analysis. Epidemiol Infect, 141(2), 269-276. doi:10.1017/s0950268812000544.
6. Gu G, Luo Z, Cevallos-Cevallos JM, Adams P, Vellidis G, Wright A, van Bruggen AH. (2013). Factors affecting the occurrence of *Escherichia coli* O157 contamination in irrigation ponds on produce farms in the Suwannee River Watershed. Can J Microbiol, 59(3), 175-182. doi:10.1139/cjm-2012-0599.

7. Jokinen CC, Edge TA, Koning W, Laing CR, Lapen DR, Miller J, Gannon, VP. (2012). Spatial and temporal drivers of zoonotic pathogen contamination of an agricultural watershed. *J Environ Qual*, 41(1), 242-252. doi:10.2134/jeq2011.0203.
8. Lal A, Ikeda T, French N, Baker MG, Hales S. (2013). Climate variability, weather and enteric disease incidence in New Zealand: time series analysis. *PLoS One*, 8(12), e83484. doi:10.1371/journal.pone.0083484.
9. Valcour JE, Charron DF, Berke O, Wilson, JB, Edge T, Waltner-Toews D. (2016). A descriptive analysis of the spatio-temporal distribution of enteric diseases in New Brunswick, Canada. *BMC Public Health*, 16, 204. doi:10.1186/s12889-016-2779-5.
10. Thomas KM, Charron DF, Waltner-Toews D, Schuster C, Maarouf AR, Holt JD. (2006). A role of high impact weather events in waterborne disease outbreaks in Canada, 1975–2001. *Int J Environ Health Res.*; 16:167–80.
11. Britton E, Hales S, Venugopal K, Baker MG. (2010). The impact of climate variability and change on cryptosporidiosis and giardiasis rates in New Zealand. *J Water Health*. 8:561–71.
12. Kelly-Hope LA, Alonso WJ, Vu DT, Dang DA, Do GC, Lee H, et al. (2007). Geographical distribution and risk factors associated with enteric diseases in Vietnam. *Am J Trop Med Hyg*, 76:706–12.
13. Wang LX, Li XJ, Fang LQ, Wang DC, Cao WC, Kan B. (2012). Association between the incidence of typhoid and paratyphoid fever and meteorological variables in Guizhou, China. *Chin Med J*.125:455–60.
14. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2007). Summary for policymakers Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, p. 7-22.

15. Santé Canada. (2008). Santé et changement climatiques : Évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada [PDF]. Repéré à l'URL : http://publications.gc.ca/collections/collection_2008/hc-sc/H128-1-08-528F.pdf
Consulté en Juillet 2018.
16. Ministère de la Santé et des Services Sociaux. (2016). Surveillance des maladies à déclaration obligatoire au Québec. Maladies d'origine infectieuse. Rapport annuel 2015. Québec. 14p <http://publications.msss.gouv.qc.ca/msss/fichiers/2016/16-268-04W.pdf>
Consulté en mai 2017.
17. Statistique Canada. (2017). Résultat du recensement 2016. Repéré à l'URL <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/rt-td/population-fra.cfm?GEOCODE=24> Consulté en mai 2017.
18. Gerardin V, Mckenney D. (2001). Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec. Direction du patrimoine écologique et du développement durable. Gouvernement du Québec. Repéré à l'URL <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/changements/classification/model-clima.pdf> Consulté en mai 2017.
19. Allen D, Lawrence K, Mckenney D. (2015). Modélisation du climat à l'échelle régionale, nationale et internationale. Gouvernement du Canada <http://scf.rncan.gc.ca/projets/3/1>. Mise à jour aout 2018, Consulté en aout 2018.
20. Hutchinson MF, Xu T. (2013). ANUSPLIN Version 4.4 User guide. Repéré à l'URL <http://fennerschool.anu.edu.au/files/anusplin44.pdf> Consulté en mai 2017.
21. Boutahar M. (2007). Séries temporelles : estimation paramétrique et non paramétrique avec le logiciel R. [Cours en ligne]. Département de mathématiques, Faculté des

- sciences de Luminy, Marseilles. Repéré à l'URL <http://lumimath.univ-mrs.fr/infoetudiant/STATSBOUTAHARMINT.pdf> Consulté en mai 2018.
22. Lal A, Hales S, French N, Baker MG. (2012). Seasonality in human zoonotic enteric diseases: a systematic review. *PLoS One* 7(4):e31883. doi:10.1371/journal.pone.0031883.
 23. Weisent J, Seaver W, Odoi A, Rohrbach B. (2014). The importance of climatic factors and outliers in predicting regional monthly campylobacteriosis risk in Georgia, USA. *Int J Biometeorol* 58: 1865-1878 DOI 10.1007/s00484-014-0788-6.
 24. Herrador BG, de Blasio BF, MacDonald E, Nichols G et al. (2015). Analytical studies assessing the association between extreme precipitation or temperature and drinking water-related waterborne infections: a review. *Environmental health* 14:29 DOI 10.1186/s12940-015-0014-y.
 25. Bekal S, Berthiaume P, Turegon P, Rakotoarinia Randriamialy MR, Thieverge K, Fiset M, Korchi SO, Pelcat Y, Odgen NH, Adam-Poupart A. (2017). Étude d'impact de la variabilité climatique sur l'incidence des zoonoses entériques au Québec. PACC 13-17. Rapport préliminaire, février 2017. [Communication personnelle].
 26. Nygard K, Andersson Y, Rottingen J, Svensson A, Lindback J, Kistemann T, Giesecke J. (2004). Association between environmental risk factors and *Campylobacter* infections in Sweden. *Epidemiol Infect* 132(2):317–325.
 27. Patrick M, Christiansen L, Waine M, Ethelberg S, Madsen H, Wegener H. (2004). Effects of climate on incidence of *Campylobacter spp.* In humans and prevalence in broiler flocks in Denmark. *Appl Environ Microbiol* 70(12):7474–7480.
 28. Kovats R, Edwards S, Charron D, Cowden J, D'Souza R, Ebi K, Gauci C, Gerner-Smidt P, Hajat S, Hales S, Hernández Pezzi G, Kriz B, Kutsar K, McKeown P, Mellou K,

- Menne B, O'Brien S, van Pelt W, Schmid H. (2005). Climate variability and *Campylobacter* infection: an international study. *Int J Biometeorol* 49(4):207–214.
29. Fleury M, Charron DF, Holt JD, Allen OB, Maarouf AR. (2006). A time series analysis of the relationship of ambient temperature and common bacterial enteric infections in two Canadian provinces. *Int J Biometeorol* 50(6):385–391.
30. Sinton LW, Braithwaite RR, Hall CH, Mackenzie ML. (2007). Survival of indicator and pathogenic bacteria in bovine feces on pasture. *Appl Environ Microbiol* 73(24):7917–7925.
31. Chang M, Groseclose SL, Zaidi AA, Braden CR. (2009). An ecological analysis of sociodemographic factors associated with the incidence of salmonellosis, shigellosis, and *E. coli* O157:H7 infections in US counties. *Epidemiology and Infection* 137: 810–820.
32. Pearl DL, Louie M, Chui L, Dore K, Grimsrud KM, et al. (2009). A MultiLevel Approach for Investigating Socio-Economic and Agricultural Risk Factors Associated with Rates of Reported Cases of *Escherichia coli* O157 in Humans in Alberta, Canada. *Zoonoses and Public Health* 56: 455–464.
33. Greer A, Ng V, Fishman D. (2008). Climate change and infectious diseases in North America: the road ahead. *Canadian Medical Association Journal* 178: 715–722. Repéré à l'URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2263103/> Consulté en juillet 2018.
34. Thomas MK, Murray R, Flockhart L, Pintar K, Pollari F, Fazil A, Marshall B. (2013). Estimates of the burden of foodborne illness in Canada for 30 specified pathogens and unspecified agents, circa 2006. *Foodborne Pathog Dis*, 10(7), 639-648. doi : 10.1089/fpd.2012.1389.

35. Samuel MC, Vugia DJ, Shallow S, Marcus R, Segler S, McGivern T, Tauxe RV. (2004). Epidemiology of sporadic *Campylobacter* infection in the United States and 207 declining trends in incidence, FoodNet 1996-1999. Clin Infect Dis, 38 Suppl 3, S165-174. doi: 10.1086/381583.
36. Bi P, Cameron AS, Zhang Y, Parton KA. (2008). Weather and notified *Campylobacter* infections in temperate and sub-tropical regions of Australia: an ecological study. J Infect. doi: 10.1016/j.jinf.2008.08.004.
37. Louis VR, Gillespie IA, O'Brien SJ, Russek-Cohen E, Pearson AD, Colwell RR. (2005). Temperature-driven *Campylobacter* seasonality in England and Wales. Appl Environ Microbiol. 71:85–92.
38. White AN, Kinlin LM, Johnson C, Spain CV, Ng V, Fisman DN. (2009). Environmental determinants of campylobacteriosis risk in Philadelphia from 1994 to 2007. EcoHealth. 6(2):200–8.
39. de Wit MA, Koopmans MP, Kortbeek LM, van Leeuwen NJ, Bartelds AI, van Duynhoven YT. (2001). Gastroenteritis in sentinel general practices, The Netherlands. Emerg Infect Dis, 7(1), 82-91. doi: 10.3201/eid0701.700082.
40. Gosselin-Théberge, M. Taboada, E. Guy, RA. (2015). Comparative evaluation of different real-time PCR assays and standard curve optimisation for enhanced accuracy in quantification of *Campylobacter* in environmental waters. (Mémoire de maîtrise, Université de Montréal). Repéré à l'URL suivant : https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/13370/Gosselin-Theberge_Maxime_2015_memoire.pdf?sequence=4 Consulté en juin 2018.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION

5.1 Synthèse des résultats

Le premier objectif de l'étude était de décrire l'évolution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine sur une période de seize ans allant de 2000 à 2015, dans les trois régions sociosanitaires sélectionnées. L'atteinte de cet objectif a permis de confirmer encore une fois, que l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine est influencée par les saisons. Elle augmente progressivement à partir du printemps pour atteindre son pic pendant l'été, au cours des mois de juillet et d'août, qui enregistrent également les températures les plus chaudes de l'année. La plupart des études antérieures réalisées au Canada et dans d'autres pays industrialisés, confirment cette tendance. L'influence des saisons chaudes sur la campylobactériose humaine pourrait s'expliquer par le fait que *Campylobacter* est une bactérie qui se multiplie très facilement dans les environnements chauds. D'ailleurs la température des milieux de culture standards utilisés pour l'isoler en laboratoire est de 35 ± 2 °C ou 42 ± 2 °C (36). Ainsi sa prolifération au sein des principales sources de contamination comme les aliments (viandes crues et produits laitiers notamment) et les sources d'eau pourrait être facilitée par les températures élevées en été. En même temps, l'été est une période favorable aux grands rassemblements humains et à la consommation de viandes souvent insuffisamment cuites sur le barbecue, facilitant ainsi la propagation de la bactérie. Par ailleurs, la fréquentation des fermes et des animaleries est l'une des activités estivales de prédilection et elle favorise la consommation directe des produits de la ferme, non pasteurisés et pourrait expliquer également la survenue d'une proportion des cas de campylobactériose chez l'humain.

Ensuite, l'étude avait pour objectif de vérifier si les variations climatiques ont un impact sur l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine au Québec. Nos principales hypothèses étaient qu'il existe une association entre d'une part, la température ambiante mensuelle, et d'autre part, les précipitations totales mensuelles et l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans les régions étudiées. Pour atteindre cet

objectif, deux modèles de séries temporelles (SARIMA et SARIMAX) ont été explorés. Cette analyse a permis de comprendre que les modèles SARIMAX étaient les meilleurs pour vérifier cette association car ils avaient les plus faibles critères d'information d'Akaike. Les résultats obtenus pour les régions sociosanitaires de Montréal et de Mauricie-et-Centre du-Québec, montrent une faible corrélation positive statistiquement significative entre la température maximale mensuelle et l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine. La corrélation avec les précipitations totales était négative et elle était statistiquement significative seulement pour la région sociosanitaire de Montréal.

Les corrélations observées paraissent faibles, mais elles pourraient avoir un impact plus important en termes de santé publique. En effet, les cas de campylobactériose considérés pour cette étude sont des cas déclarés et représentent comme déjà mentionné précédemment, une faible proportion des cas réels dans la population. En pratique, seuls les cas sévères consulteront un médecin et se verront prescrire un test de laboratoire pour confirmer le diagnostic de la campylobactériose. Ainsi, l'augmentation de l'incidence mensuelle de la campylobactériose de 0,0339 pour 100000 habitants, observée pour la RSS de Montréal représente une augmentation de moins d'un cas diagnostiqué par mois. Par contre ce nombre serait plus important si l'augmentation était rapportée au nombre de cas non diagnostiqués de campylobactériose qui serait 24 à 49 fois plus élevé que les cas diagnostiqués (34).

L'association négative avec les précipitations observées dans la RSS de Montréal pourrait être attribuée aux caractéristiques urbaines de cette région par rapport aux deux autres régions étudiées. En tant que zone urbaine, la région de Montréal possède des caractéristiques importantes telles que l'absence quasi complète de fermes et la présence moins importante de de cours d'eau, qui pourraient jouer un rôle protecteur.

Dans la région sociosanitaire de la Capitale-Nationale, les résultats de l'analyse SARIMAX n'étaient pas significatifs. Dans cette région, seule la corrélation croisée effectuée à partir du modèle SARIMA a montré une relation inverse entre la température maximale mensuelle et l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine.

De plus, les résultats sont variables d'une région à l'autre ce qui pourrait être attribué à la grande diversification du climat au Québec. Gérardin et al. (2001) avaient réussi à regrouper les différents types de climat canadien en quinze classes selon la classification de Litynski (Figure 3 en annexe) (65). Dans le cadre de ce travail, les trois régions sociosanitaires étudiées ont été sélectionnées à partir d'un regroupement par zone climatique, basé sur la classification de Litynski (Figure 4 et Tableau IV en annexe). Les résultats de l'analyse de séries temporelles pour la région sociosanitaire de la Capitale-Nationale semblent très éloignés de ceux des deux autres régions. Cette situation pourrait se justifier par son appartenance à une zone climatique plus froide (la zone subpolaire froide).

Aussi, les variables climatiques utilisées pourraient-elles avoir influencé les résultats de la corrélation? Pour la température, à la place des températures mensuelles minimales ou moyennes, nous avons opté pour la température mensuelle maximale qui représentait la moyenne des températures maximales journalières au cours du mois. Elle permettait ainsi d'apprécier le niveau moyen le plus élevé de chaleur enregistrée au cours d'un mois.

En ce qui concerne les précipitations totales, elles incluent la neige et la pluie, et ne représentent pas le meilleur choix pour analyser la corrélation entre les précipitations et l'incidence de la campylobactériose humaine qui est beaucoup plus influencée par les précipitations pluviales. Ce choix a été fait au moment de la conception de l'étude alors que les données fiables sur les précipitations pluviales n'étaient pas disponibles.

Enfin, la possibilité de prédire l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine a fait l'objet d'une étude exploratoire. En effet, les données climatiques de 2016 et 2017 indispensables pour réaliser les projections à partir des modèles SARIMAX n'étant pas accessibles au moment de l'analyse, quelques essais de prévisions de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine ont été faits uniquement à partir des modèles SARIMA. La librairie « *Forecast* » de la version 3.3.1 du logiciel R a été utilisée pour prédire l'incidence cumulée d'un mois à partir de celle du mois précédent. Les prévisions étaient faites sur une période de deux ans pour les années 2016 et 2017 (Figure 2A, 2B, 2C). Les incidences cumulées mensuelles prédites étaient ensuite comparées aux incidences cumulées mensuelles observées des mêmes années (Tableau III). La valeur absolue de la différence entre les incidences cumulées mensuelles de la campylobactériose humaine projetées et observées (ou erreur) ainsi que le pourcentage de l'erreur ont été utilisés pour vérifier le niveau de précision des modèles pour la prévision. Pour les trois régions sociosanitaires, l'incidence cumulée mensuelle prédite de la campylobactériose humaine maintient une tendance saisonnière. La différence entre l'incidence cumulée mensuelle projetée et l'incidence cumulée mensuelle observée est variable d'un mois à l'autre avec une moyenne absolue pour 100 000 habitants, de 0,54 pour la région de Montréal, 0,29 pour la région de Mauricie-et-Centre-du-Québec et de 0,57 pour celle de la Capitale-Nationale. Le risque d'erreur était de 25% pour les régions sociosanitaires de Montréal et de Mauricie-et-Centre-du-Québec et de 18% pour celle de la Capitale-Nationale.

Ce volet de notre étude a permis de valider que l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans les trois régions sociosanitaires sélectionnées pourrait être prédite. Il représente une étape préliminaire à plusieurs travaux déjà prévus qui permettront d'élaborer des modèles de prévisions plus précis pour chaque région sociosanitaire et qui

pourront être validés sur de plus longues périodes. D'autres variables climatiques pourront également être intégrées à l'analyse.

5.2 Forces de l'étude

Il s'agit d'une étude écologique, descriptive de tendances temporelles, sur une durée de seize ans, allant de 2000 à 2015. Les données sur les cas de campylobactériose proviennent de la base de données des maladies à déclaration obligatoire du Québec. Ce sont des données collectées à partir des déclarations des médecins et des laboratoires, qui offrent de ce fait, l'avantage d'être fiables.

Les données climatiques concernant la température ambiante et le niveau de précipitations ont été collectées à partir d'une moyenne de 300 stations météorologiques, dans un rayon de 2 km, avec des algorithmes précis. Elles ont été mises à notre disposition par le Centre de recherche des ressources forestières (appartenant au Service des Ressources naturelles Canada).

Le devis d'étude, en plus d'être rapide et peu onéreux, a permis de confirmer les hypothèses de départ et de conclure que la température ambiante maximale serait un indicateur de surveillance de la campylobactériose au niveau populationnel dans les régions étudiées.

5.3 Limites de l'étude

Biais de sélection

Seuls les cas confirmés au laboratoire et déclarés dans le registre des MADO ont été pris en compte dans cette étude et ne sont pas représentatifs de la proportion des cas réels dans la population. En effet, la campylobactériose est l'entérozoonose la plus déclarée au Québec, mais elle reste une maladie sous diagnostiquée. Seules les personnes présentant des symptômes

graves, les jeunes enfants ou les personnes âgées ou ayant une santé fragile consulteront un médecin. Comme l'évolution se fait assez souvent spontanément vers la guérison, la prescription des tests spécifiques pour l'identification de *Campylobacter* n'est pas toujours justifiée.

Pour l'association avec les précipitations, les données sur les précipitations pluviales n'étaient pas disponibles au moment de la conception de l'étude. L'utilisation des précipitations totales pourrait avoir dilué l'effet des précipitations pluviales. Des études plus précises considérant uniquement les précipitations pluviales devraient être réalisées.

Biais d'information

Les relations observées empiriquement entre les diverses variables climatiques et épidémiologiques ont été décrites à partir des données agrégées (paramètres mensuels, échelle populationnelle) et ne pourront donc pas être extrapolées au niveau individuel.

L'inaccessibilité des données climatiques hebdomadaires au moment de la conception de l'étude, a conduit au choix de faire une analyse sur des données mensuelles. Cela pourrait avoir influencé l'observation des temps de décalage

Autres limites

Pour le choix des modèles SARIMA et SARIMAX, un compromis a été effectué entre l'ajustement du modèle à la série de données dont nous disposons et la complexité du modèle. En effet, un nombre élevé de paramètres est nécessaire pour ajuster parfaitement le modèle aux données. Or, plus le nombre de paramètres est élevé, plus le modèle devient complexe et requiert une plus longue période d'observation pour être validé.

Validité externe

En ce qui concerne les résultats obtenus par notre étude, ils pourraient être extrapolés à des régions socio sanitaires possédant des caractéristiques climatiques et épidémiologiques semblables. Cependant, la prudence est de rigueur quant à sa validité externe car elle est limitée par la diversité des caractéristiques socio-économiques, démographiques, bioclimatiques présentes au Québec, des facteurs qui jouent un rôle important sur la présence des zoonoses.

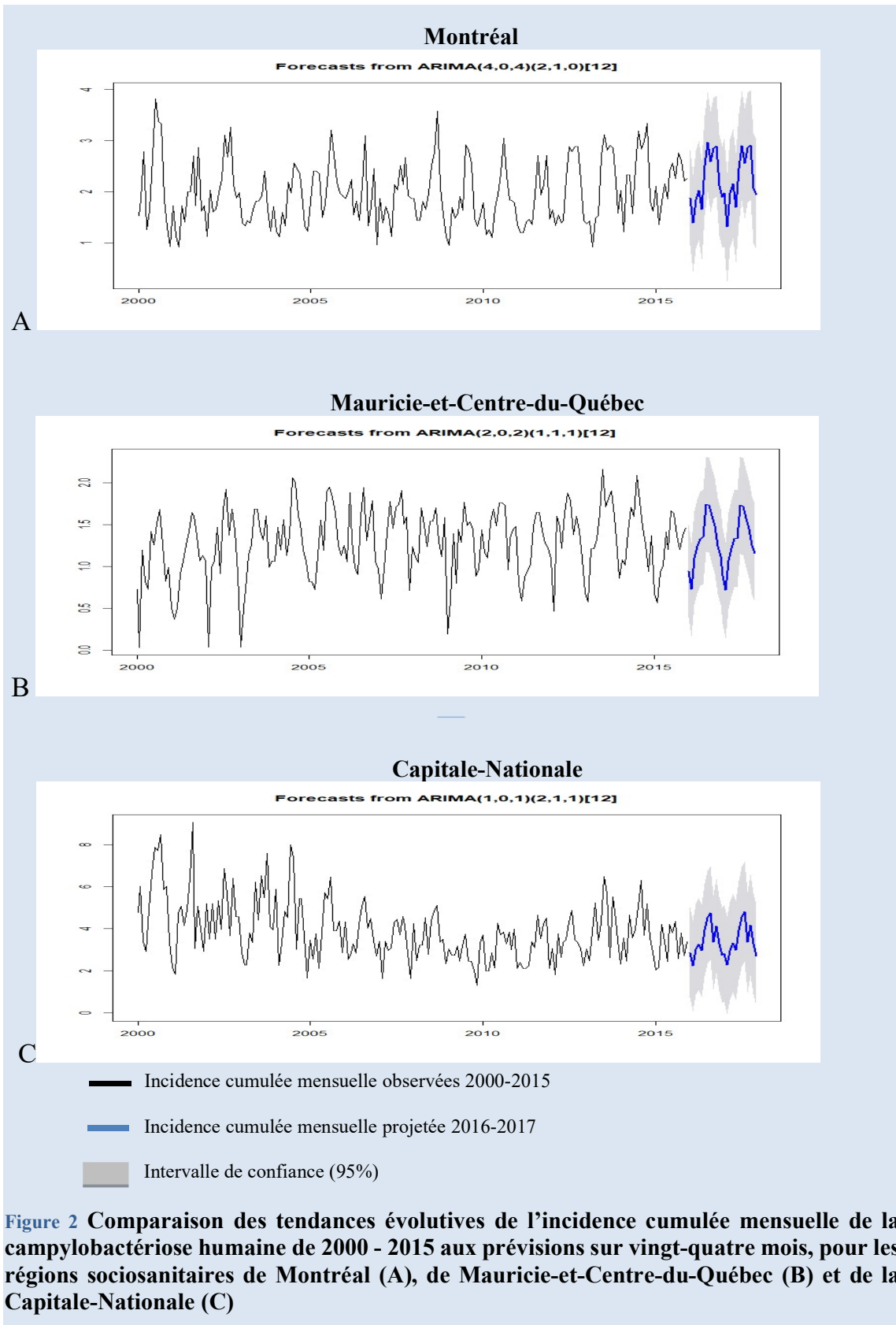


Tableau III: Comparaison entre l'incidence cumulée mensuelle projetée sur deux ans (IP) et l'incidence cumulée mensuelle observée de 2016 et 2017 (IO) de la campylobactériose humaine dans les trois régions sociosanitaires

Période	Montréal				Mauricie-et Centre-du-Québec				Capitale-Nationale			
	IP	IO	Erreur	%Erreur	IP	IO*	Erreur	%Erreur	IP	IO	Erreur	%Erreur
01-2016	1,88	1,79	-0,09	-4,79	0,94	1,01	0,07	6,93	2,86	3,10	0,24	8,39
02-2016	1,39	2,04	0,65	46,76	0,73	1,50	0,77	51,33	2,24	3,50	1,26	56,25
03-2016	1,85	1,94	0,09	4,86	1,10	1,36	0,26	19,12	3,03	1,89	-1,14	-37,62
04-2016	2,02	1,99	-0,03	-1,49	1,24	1,26	0,02	1,59	3,27	2,83	-0,44	-13,46
05-2016	1,65	1,69	0,04	2,42	1,33	1,07	-0,26	-24,30	2,96	2,69	-0,27	-9,12
06-2016	2,51	1,59	-0,92	-36,65	1,35	1,86	0,51	27,42	3,95	3,23	-0,72	-18,23
07-2016	2,97	2,04	-0,93	-31,31	1,74	2,59	0,85	32,82	4,54	5,25	0,71	15,64
08-2016	2,59	3,44	0,85	32,82	1,73	1,95	0,22	11,28	4,74	4,98	0,24	5,06
09-2016	2,85	3,19	0,34	11,93	1,60	1,26	-0,34	-26,98	3,36	4,18	0,82	24,40
10-2016	2,89	2,79	-0,10	-3,46	1,48	1,77	0,29	16,38	4,13	4,31	0,18	4,36
11-2016	2,12	2,34	0,22	10,38	1,24	1,07	-0,17	-15,89	3,28	3,10	-0,18	-5,49
12-2016	1,90	2,24	0,34	17,89	1,12	1,20	0,08	6,67	2,73	2,56	-0,17	-6,23
01-2017	1,98	1,67	-0,31	-15,66	0,89	1,08	0,19	17,59	2,82	2,39	-0,43	-15,25
02-2017	1,32	2,78	1,46	110,61	0,72	1,15	0,43	37,39	2,28	2,95	0,67	29,39
03-2017	1,98	2,48	0,50	25,25	1,07	1,51	0,44	29,14	2,96	3,09	0,13	4,39
04-2017	2,16	2,93	0,77	35,65	1,22	1,21	-0,01	-0,83	3,32	4,07	0,75	22,59
05-2017	1,70	2,07	0,37	21,76	1,33	1,47	0,14	9,52	2,98	3,23	0,25	8,39
06-2017	2,46	2,93	0,47	19,11	1,33	1,21	-0,12	-9,92	3,92	2,81	-1,11	-28,32
07-2017	2,90	2,98	0,08	2,76	1,73	1,84	0,11	5,98	4,55	5,05	0,50	10,99
08-2017	2,56	5,56	3,00	117,19	1,72	1,90	0,18	9,47	4,81	4,63	-0,18	-3,74
09-2017	2,86	3,84	0,98	34,27	1,57	1,32	-0,25	-18,94	3,36	3,79	0,43	12,80
10-2017	2,91	3,03	0,12	4,12	1,45	1,90	0,45	23,68	4,16	4,07	-0,09	-2,16
11-2017	2,07	2,32	0,25	12,08	1,25	1,55	0,30	19,35	3,28	4,77	1,49	45,43
12-2017	1,94	1,97	0,03	1,55	1,16	1,67	0,51	30,54	2,71	4,08	1,37	50,55
Moyenne absolue			0,54	25,00			0,29	24,71			0,57	18,26

*Transformation log de l'incidence cumulée mensuelle observée

CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

En somme, l'objectif de l'étude au départ, était d'identifier des indicateurs climatiques qui pourraient être utilisés pour la surveillance de la campylobactériose au Québec et pour orienter les efforts de prévention et de contrôle de cette dernière. Pour atteindre cet objectif, il fallait décrire l'évolution de l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine dans trois régions sociosanitaires du Québec de 2000 à 2015; analyser son association avec la température ambiante maximale mensuelle ainsi que les précipitations totales mensuelles, pour la même période d'étude dans ces trois régions sociosanitaires et identifier le meilleur modèle prédictif de son évolution dans les régions étudiées.

Cette étude a permis d'observer que l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose a une tendance saisonnière dans les trois régions étudiées. Il existe une faible association entre l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose humaine et les variables climatiques telles que la température ambiante maximale mensuelle et le niveau de précipitations totales mensuelles, dans les régions sociosanitaires de Montréal et de Mauricie-et-Centre-du-Québec.

Dans le but d'avancer une réponse à l'égard du troisième objectif, nous avons voulu identifier également un modèle de séries temporelles SARIMA pouvant prédire l'incidence cumulée mensuelle de la campylobactériose dans les trois régions étudiées. Cependant, plusieurs interrogations méritent encore d'être élucidées dans des études ultérieures. En effet, la relation avec la température ambiante maximale et les précipitations totales a été explorée, mais il existe d'autres variables climatiques comme l'humidité relative et la durée de la saison de croissance des végétaux qui pourraient être associées à l'incidence de la campylobactériose. De plus, une étude considérant les précipitations pluviales à la place des précipitations totales pourrait permettre de mieux expliquer l'effet des précipitations. Aussi, seulement trois des dix-huit régions sociosanitaires ont fait l'objet de la modélisation. Les autres régions sociosanitaires pourraient également être étudiées. En dehors de la campylobactériose, il serait intéressant

d'analyser aussi les autres entérozoonoses telles que la salmonellose, la bartonellose, la cryptosporidiose, la giardiase et l'infection à *Escherichia coli*.

A l'issue de l'étude, quelques recommandations sont formulées. Au niveau national, nous suggérons le renforcement des systèmes de déclaration des cas et des éclosions de source zoonotique et la mise à jour des bases de données pour toutes les régions sociosanitaires. Cela permettrait de disposer des observations complètes pour toutes les régions sociosanitaires.

Pour les données climatiques, nous suggérons une amélioration de l'accessibilité à des observations plus précises (hebdomadaires et journalières) et plus détaillées, permettant de distinguer par exemple, le niveau de pluie des précipitations totales.

En ce qui concerne les méthodes d'analyse de séries temporelles, nous recommandons l'augmentation des ressources techniques et le développement de cette expertise au sein du réseau de la recherche en santé du Québec. Cela encouragerait leur utilisation par les chercheurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Hoffmann S et Anekwe TD. (2013). Making sense of recent cost-of-Foodborne-illness Estimates. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, EIB-118. Repéré à l'URL suivant: https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/43796/40344_eib118.pdf?v=42402 consulté en décembre 2018.
2. Karesh WB, Donson A, Lloyd-Smith JO et al. (2012). Ecology of zoonoses: natural and unnatural histories. *Lancet*, 2012. 380(9857) : p. 1936-1945. Repéré à l'URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014067361261678X?via%3Dihub> Consulté le 5 mai 2017.
3. Bouchard C, Lowe AM, Simon A. (2017). Portrait des zoonoses priorisées par l'observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques en 2015. Format PDF. Repéré à l'URL https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2290_portrait_zoonoses_priorisees_2015.pdf Consulté le 22 août 2018.
4. Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec. (2016). Surveillance des maladies à déclaration obligatoire au Québec. Maladies d'origine infectieuse. Rapport annuel 2015. Québec. 14p Repéré à l'URL suivant : <http://publications.msss.gouv.qc.ca/msss/fichiers/2016/16-268-04W.pdf> Consulté en mai 2017.
5. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2007). Summary for policymakers [Résumé à l'intention des décideurs] Panel on Climate Change Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, p. 7-22.
6. O'Dwyer J, Dowling A, Adley C. (2016). The Impact of Climate Change on the Incidence of Infectious Waterborne Disease. *Urban Water Reuse Handbook – Chapter 77*. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, FL, USA. Pages 1017-1026.
7. Santé Canada. (2008). Santé et changements climatiques : Évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada [PDF]. Repéré à l'URL : http://publications.gc.ca/collections/collection_2008/hc-sc/H128-1-08-528F.pdf Consulté en Juillet 2018.
8. Environnement et Changements climatiques Canada. (2016). Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Changements de la température au Canada. Disponible à l'URL : www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=64C9E931-1 Consulté le 24 août 2017.
9. Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels de l'Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ). (2006). Événements climatiques extrêmes et santé : examen des initiatives actuelles d'adaptation aux changements climatiques au Québec, Gouvernement du Québec. Repéré à l'URL

https://www.inspq.gc.ca/pdf/publications/518-ChangementsClimatiques_EvenementsClimatiques.pdf Consulté le 2 mai 2017.

10. Sécurité publique Canada. (2016). Base de données canadiennes sur les catastrophes. Gouvernement du Canada. Repéré à l'URL suivant : <http://bdc.securitepublique.gc.ca/srchpg-fra.aspx?dynamic=false> Consulté le 22 août 2018.
11. Inondations printanières de 2017 au Québec. (Juin 2018). Dans Wikipedia l'encyclopédie libre. Repéré à l'URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Inondations_printani%C3%A8res_de_2017_au_Qu%C3%A9bec Consulté en juillet 2018.
12. Soto JC. (2018) Projet Entérozoonoses et variations climatiques au Québec. DRBST, Institut national de santé publique du Québec. Communication interne.
13. Desjarlais C et al. (2010). Savoir s'adapter aux changements climatiques. OURANOS, Montréal. 124 p. Repéré à l'adresse URL: http://www.ouranos.ca/media/nouvelle/document/53_ssec_21_06_lr.pdf. Consultée le 22 août 2018.
14. Gale P et al. (2009). The effect of climate change on the occurrence and prevalence of livestock diseases in Great Britain: a review. *J Appl Microbiol.* 106: 1409–23.
15. Nichols G, Lane C, Asgari N, Verlander NQ, Charlett A. (2009). Rainfall and outbreaks of drinking water related disease and in England and Wales. *J Water Health*, 7(1), 1-8. doi:10.2166/wh.2009.143.
16. Weisent J, Seaver W, Odoi A, Rohrbach B. (2014). The importance of climatic factors and outliers in predicting regional monthly *Campylobacteriosis* risk in Georgia, USA. *Int J Biometeorol* 58: 1865-1878 DOI 10.1007/s00484-014-0788-6.
17. Tam CC, Rodrigues LC, Viviani L, Dodds JP, Evans MR, Hunter PR, et al. (2012). Longitudinal study of infectious intestinal disease in the UK (IID2 study): incidence in the community and presenting to general practice. *Gut.* 2012;61:69-77. Epub 2011/06/29.
18. Kovats R, Edwards S, Charron D, Cowden J, D'Souza R, Ebi K, Gauci C, Gerner-Smidt P, Hajat S, Hales S, Hernández Pezzi G, Kriz B, Kutsar K, McKeown P, Mellou K, Menne B, O'Brien S, van Pelt W, Schmid H. (2005). Climate variability and *Campylobacter* infection: an international study. *Int J Biometeorol* 49(4):207–214.
19. Fleury M, Charron DF, Holt JD, Allen OB, Maarouf AR. (2006). A time series analysis of the relationship of ambient temperature and common bacterial enteric infections in two Canadian provinces. *Int J Biometeorol* 50(6):385–391
20. Nygard K, Andersson Y, Rottingen J, Svensson A, Lindback J, Kistemann T, Giesecke J. (2004). Association between environmental risk factors and *Campylobacter* infections in Sweden. *Epidemiol Infect* 132(2):317–325.

21. Patrick M, Christiansen L, Waine M, Ethelberg S, Madsen H, Wegener H. (2004). Effects of climate on incidence of *Campylobacter* spp. in humans and prevalence in broiler flocks in Denmark. *Appl Environ Microbiol* 70(12):7474–7480.
22. Sinton LW, Braithwaite RR, Hall CH, Mackenzie ML. (2007). Survival of indicator and pathogenic bacteria in bovine feces on pasture. *Appl Environ Microbiol* 73(24):7917–7925.
23. Louis VR, Gillespie IA, O’Brien SJ, Russek-Cohen E, Pearson AD, Colwell RR. (2005). Temperature-driven *Campylobacter* seasonality in England and Wales. *Appl Environ Microbiol*. 71:85–92.
24. White AN, Kinlin LM, Johnson C, Spain CV, Ng V, Fisman DN. (2009). Environmental determinants of *Campylobacteriosis* risk in Philadelphia from 1994 to 2007. *EcoHealth*. 6(2):200–8.
25. Lal A, Ikeda T, French N, Baker MG, Hales S. (2013). Climate variability, weather and enteric disease incidence in New Zealand: time series analysis. *PLoS One*, 8(12), e83484. doi: 10.1371/journal.pone.0083484.
26. Bekal S, Berthiaume P, Turgeon P et al. (2017). Étude d’impact de la variabilité climatique sur l’incidence des zoonoses entériques au Québec. PACC 13-17. Rapport préliminaire, février 2017. Communication personnelle.
27. Chang X, Gao M, Wang Y et Hou X. (2012). Seasonal autoregressive integrated moving average model for precipitation time series. *Journal of Mathematics and Statistics*, 8 (4): 500-505. <http://thescipub.com/PDF/jmssp.2012.500.505.pdf> Consulté en janvier 2018.
28. World Health Organization. (1959). Joint WHO/FAAO expert committee on zoonoses. WHO technical report series no. 169; 1959. - Genève: The Organization, 1959. Disponible à l’URL http://www.who.int/foodsafety/areas_work/zoonose/fr/ Consulté le 4 août 2018.
29. Michel P, Bigras-Poulin M, Ravel A, Berthiaume P. (2004, juillet). Modélisation, indices et déterminants agroenvironnementaux des zoonoses. Communication présentée au 23^{ème} Congrès mondial de buiatrie, Québec Canada.
30. Organisation Météorologique Mondiale (OMM). (2007). Bilan 2007 des changements climatiques: rapport de synthèse, GIEC 92-9169-222-0.
31. Gouvernement du Canada. (2018). Glossaire Environnement et ressources naturelles. Réperé à l’URL http://climat.meteo.gc.ca/glossary_f.html#. Consulté le 24 août 2018.
32. Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Canada. (2016). *Campylobactériose* (Infection à *Campylobacter*), fiches techniques mise à jour en avril 2016. Réperé à l’URL suivant : <http://publications.msss.gouv.qc.ca/msss/fichiers/guide-garderie/chap7-Campylobacteriose.pdf> Consulté en septembre 2017.
33. Skirrow MB, Blaser MJ. (2015). *Campylobacter jejuni*. New York: Raven Press. *Infections of the gastro-intestinal tract* (p. 825-848).
34. Peterson MC. (1994). Clinical aspects of *Campylobacter jejuni* infections in adults. *West J Med* 161(2), 148-162.

35. Murray CJ, Vos T, Lozano R, Naghavi M, Flaxman AD, Michaud C, et al. (2012). Disability-adjusted life years (DALYs) for 291 diseases and injuries in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet*. 2012; 380(9859):2197-223. Epub 2012/12/19.
36. Gosselin-Théberge, M. Taboada, E. Guy, RA. (2015). Comparative evaluation of different real-time PCR assays and standard curve optimisation for enhanced accuracy in quantification of *Campylobacter* in environmental waters. (Mémoire de maîtrise, Université de Montréal). Repéré à l'URL suivant : https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/13370/Gosselin-Theberge_Maxime_2015_memoire.pdf?sequence=4 Consulté en juin 2018.
37. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Organization for Animal Health. (2013). The global view of *Campylobacteriosis*: report of an expert consultation, Utrecht, Netherlands, 9-11 July 2012. World Health Organization 57p. Repéré à l'URL suivant: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/80751/1/9789241564601_eng.pdf Consulté en février 2017.
38. Westrell T, Ciampa N, Boelaert F, Helwigh B, et al. (2009). Zoonotic infections in Europe in 2007: A summary of the EFSA-ECDC annual report. *Euro Surveill*, 14(3).
39. Baker MG, Sneyd E, Wilson NA. (2007). Is the major increase in notified *Campylobacteriosis* in New Zealand real? *Epidemiol Infect* 135(1). 163-170. Doi: 10.1017/s0950268806006583.
40. Centers for Disease Control (CDC). (2014). Foodborne diseases active surveillance network (FoodNet): FoodNet Surveillance Report for 2012. Centers for Disease Control and Prevention of Atlanta Georgia: Department of Health and Human Services.
41. FoodNet Canada. (2013). FoodNet Canada Rapport annuel 2013. Repéré à l'URL <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/publications/aliments-et-nutrition/2013-foodnet-canada-rapport-annuel.html> Consulté le 16 août 2018.
42. Stanley K, Jones K. (2003). Cattles and sheep farms as reservoir of *Campylobacter*. *J Appl Microbiol*, 94 Suppl, 104s-113s.
43. Gras L, SMID J, WAGENAAR J. (2013). Increased risk for *Campylobacter jejuni* and *C. coli* infection of pet origin in dog owners and evidence for genetic association between strains causing infection in humans and their pets. *Epidemiology and Infection*, 141(12), 2526-2535. doi:10.1017/S0950268813000356.
44. Potter R, Church K, John BH, William N. (2003). Risk Factors for Sporadic *Campylobacter jejuni* Infections in Rural Michigan: A Prospective Case–Control Study. *American Journal of Public Health* 92 (12), 2118-2123. DOI 10.2105/AJPH.93.12.2118.

45. Hipel KW, Zhao NZ, Kilgour DM. (2003). Risk Analysis of the Walkerton Drinking Water Crisis. Canadian Water Resources Journal [Revue canadienne des ressources hydriques], 28(3) 395-419.
46. Gubbels SM, Kuhn KG, Larson JT. (2012). A waterborne outbreak with a single clone of *Campylobacter jejuni* in the Danish town of Køge in May 2010. Scandinavian Journal of Infectious Diseases, 44(8), 586-594.
47. Butler AJ, Thomas MK, Pintar KDM. (2015). Expert Elicitation to Attribute 28 Enteric Pathogens to Foodborne, Waterborne, Animal Contact, and Person-to-Person Transmission Routes in Canada. Food Pathogens and Diseases, 12(4) Répéré à l'URL suivant : <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/fpd.2014.1856> Consulté le 23 août 2018.
48. Santé Canada. (2000). Définition des cas de maladies faisant l'objet d'une surveillance nationale. Relevé des maladies transmissibles au Canada, mai 2000 vol 2653, <http://publications.gc.ca/collections/Collection/H12-21-3-26-3F.pdf> Consulté en mai 2017.
49. Ministère de la santé et des services sociaux. (2018). Mise à jour 2018 sur la Campylobactériose, Février 2018. Repéré à l'URL suivant : <http://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/zoonoses/Campylobacteriose/> consulté en avril 2018.
50. Institut de l'eau de l'Université de Caroline du Nord. (2011). Technologie pour l'adaptation aux changements climatiques [PDF]. Repéré à l'URL suivant : [file:///C:/Users/Christiane%20%20C%20LAWSON/Downloads/Water-Sector_Adaptation_French%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Christiane%20%20C%20LAWSON/Downloads/Water-Sector_Adaptation_French%20(2).pdf) Consulté en mai 2018.
51. Adam-Poupart A, Labrèche F, Smargiassi A, Duguay P, busque MA, Gagné C, Zayeb J. (2012). Impact des changements climatiques sur la santé et la sécurité des travailleurs [PDF]. Repéré à l'URL suivant : <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-733.pdf> Consulté en août 2018.
52. Anjana S, Kumar SS, Lokesh K, Chandan BR, et Varsha S. (2014). Evaluation of Water Quality of River Narmada and Its Correlation with Occurrence of Enteropathogens. J Environ Sci Eng, 56, 1, 45-52.
53. Grjibovski AM, Bushueva V, Boltenkov VP, Buzinov RV, Degteva GN, Yurasova ED, et Nurse J. (2013). Climate variations and salmonellosis in northwest Russia: a time-series analysis. Epidemiol Infect, 141(2), 269-276. doi:10.1017/s0950268812000544.
54. Gu G, Luo Z, Cevallos-Cevallos JM, Adams P, Vellidis G, Wright A, van Bruggen AH. (2013). Factors affecting the occurrence of Escherichia coli O157 contamination in irrigation ponds on produce farms in the Suwannee River Watershed. Can J Microbiol, 59(3), 175-182. doi:10.1139/cjm-2012-0599.

55. Holvoet K, Sampers I, Seynnaeve M, Uyttendaele M. (2014). Relationships among hygiene indicators and enteric pathogens in irrigation water, soil and lettuce and the impact of climatic conditions on contamination in the lettuce primary production. *Int J Food Microbiol*, 171, 21-31. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.009.
56. Britton E, Hales S, Venugopal K, Baker GM. (2010). The impact of climate variability and change on cryptosporidiosis and giardiasis rates in New Zealand. *Journal of water and health* 08.3 2010.
57. Wilson N, Slaney D, Baker MG, Hales S, Britton E. (2011). Climate change and infectious diseases in New Zealand: a brief review and tentative research agenda. *Rev Environ Health*, 26(2), 93-99.
58. Herrador BG, de Blasio BF, MacDonald E, Nichols G et al. (2015). Analytical studies assessing the association between extreme precipitation or temperature and drinking water-related waterborne infections: a review. *Environmental health* 14:29 DOI 10.1186/s12940-015-0014-y.
59. Thomas KM, Charron DF, Waltner-Toews D, Schuster C, Maarouf AR, Holt JD. (2006). A role of high impact weather events in waterborne disease outbreaks in Canada, 1975–2001. *Int J Environ Health Res.*; 16:167–80.
60. Harper SL, Edge VL, Schuster-Wallace CJ, Berke O, McEwen SA. (2007). Weather, water quality and infectious gastrointestinal illness in two Inuit communities in Nunatsiavut, Canada: potential implications for climate change. *EcoHealth*. 2011; 8:93–108.
61. Arsenault J, Ravel A, Michel P, Berke O, Gosselin P. (2011). Do Patients with recurrent episodes of *Campylobacteriosis* differ from those with a single disease event? *BMC Public Health*, 11, 32. Doi: 10.1186/1471-2458-11-32.
62. Jokinen CC, Edge TA, Koning W, Laing CR, Lapen DR, Miller J, Gannon VP. (2012). Spatial and temporal drivers of zoonotic pathogen contamination of an agricultural watershed in Canada. *J Environ Qual*, 41(1), 242-252. doi:10.2134/jeq2011.0203.
63. Jokinen CC, Koot J, Cole L, Desruisseau A, Edge TA, Khan IU, Gannon VP. (2015). The distribution of *Salmonella enterica* serovars and subtypes in surface water from five agricultural regions across Canada. *Water Res*, 76, 120-131. doi: 10.1016/j.watres.2015.02.038.
64. Valcour JE, Charron DF, Berke O, Wilson JB, Edge T, Waltner-Toews D. (2016). A descriptive analysis of the spatio-temporal distribution of enteric diseases in New Brunswick, Canada. *BMC Public Health*, 16, 204. doi :10.1186/s12889-016-2779-5.
65. Gerardin V, Mckenney D. (2001). Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec. Direction du patrimoine écologique et du développement durable. Gouvernement du Québec. Repéré à l'URL

- <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/classification/model-clima.pdf> Consulté en mai 2017.
66. Allen D, Lawrence K, Mckenney D. (2015). Modélisation du climat à l'échelle régionale, nationale et internationale. Gouvernement du Canada <http://scf.rncan.gc.ca/projets/3/1>. Mise à jour aout 2018, Consulté en aout 2018.
67. Hutchinson MF, Xu T. (2013). ANUSPLIN Version 4.4 User guide. Repéré à l'URL <http://femnerschool.anu.edu.au/files/anusplin44.pdf> Consulté en mai 2017.
68. César E, Richard B. (2006). Module XML et Data Mining-mars 2006. Les séries temporelles. Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.
69. Bowerman BL, O'Connell RT. (1979). Time series and forecasting: an applied approach (*3rd Edition*) North Scituate, Duxbury Press.
70. Tandonnet M, (2018). Régions sociosanitaires du Québec. Projection NAD83 Québec Lambert. Bureau d'information et d'étude en santé des populations (BIESP) de l'Institut national de santé publique du Québec.

ANNEXES

Annexe 1

Cost of foodborne illness estimates for <i>Campylobacter</i> (all species)							
Mean estimates, 2013							
	Total	Acute illnesses				Chronic	
		Non-hospitalized		Hospitalized	Post-hospitalization outcomes		Morbidity illness with Guillan Barré syndrome
Health outcomes	Total cases	Didn't visit physician; recovered	Visited physician; recovered	Hospitalized	Post-hospitalization recovery	Hospitalized; died	
Number of cases	845 024						
Cases by outcome		790 930	45 631	8 463	8 387	76	1 916
Medical costs							
Physician office visits			\$8 685 436	\$805 421	\$1 140 269		
Emergency room visits			\$2 614 374	\$1 454 623	\$0		
Outpatient clinic visits			\$9 018 943	\$1 115 131	\$0		
Hospitalizations			\$0	\$117 957 499	\$0		
Total medical costs by outcome			\$20 318 753	\$121 332 675	\$1 140 269		
Premature death						\$657 959 135	\$748 428 516
Productivity loss, nonfatal cases		\$44 709 190	\$8 043 747	\$4 305 437	\$2 133 387		
Total costs by outcome		\$44 709 190	\$28 362 500	\$125 638 112	\$3 273 656	\$657 959 135	\$320 416 057
Total cost of illness	\$1 928 787 166						

Note: In each pathogen Excel file, the spreadsheets for low, mean, and high costs of foodborne illness are linked to the spreadsheet with assumptions used in estimating cost-of-illness estimates for that pathogen. Users may change the assumptions in the per-case assumptions worksheet to conduct sensitivity analysis on the influence of specific per-case assumptions. They may also update per-case costs in the per-case assumptions worksheet for inflation and income growth by using information from the Consumer Price Indexes Excel spreadsheet and the VSL Excel spreadsheet provided as part of this data product. See the Documentation page of this data product for further guidance.

ERS's mean estimate of the total annual cost of foodborne illness from *Campylobacter* in 2013 dollars is \$1,928,787,166.

Source: This spreadsheet is based on:

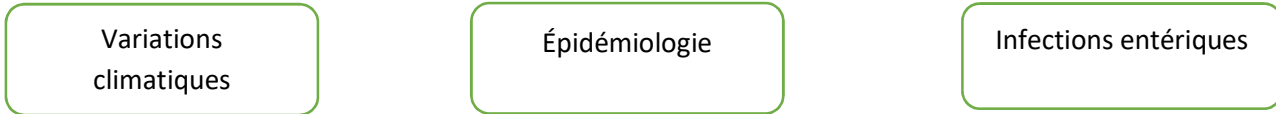
Hoffmann, Sandra, Michael Batz, J. Glenn Morris Jr. 2012. "Annual Cost of Illness and Quality-Adjusted Life Year Losses in the United States Due to 14 Foodborne Pathogens." *J. Food Protection* 75(7): 1291-1302; and

Batz, Michael B., Sandra A. Hoffmann, J. Glenn Morris Jr. 2014. Disease-Outcome Trees, EQ-5D Scores, and Estimated Annual Losses of Quality-Adjusted Life Years (QALYs) Due to 14 Foodborne Pathogens in the United States. *Foodborne Pathogen and Disease* 11(5): 395-402.

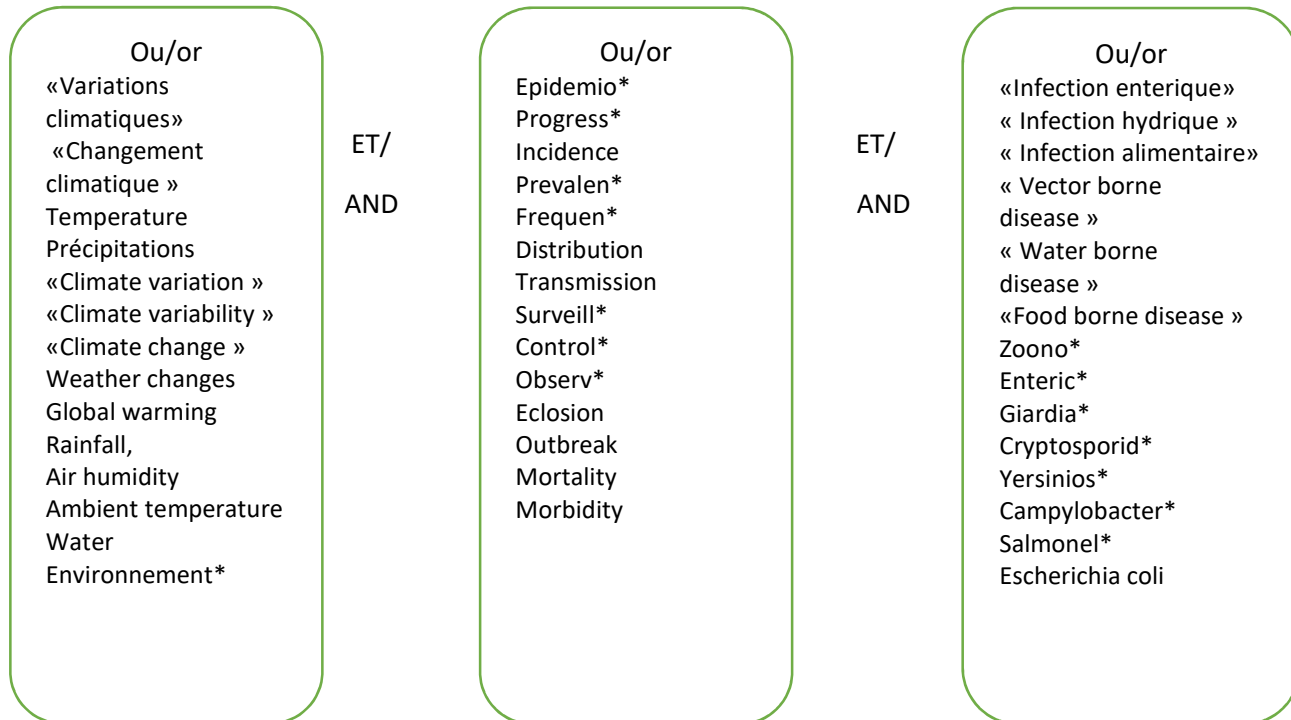
Plan de concepts pour la recension des écrits

Sujet de recherche: Impact des variations climatiques sur l'épidémiologie des infections entériques de type zoonotique au Québec

Concepts



Mots clés / descripteurs



Annexe 3

Equation de recherche dans PubMed

Search (((("Climate Change"[Mesh]) OR "Global Warming"[Mesh]) OR changing climates[Title/Abstract]) OR changing climate[Title/Abstract]) OR climate factor[Title/Abstract]) OR "Greenhouse Effect"[Mesh]) OR weather change[Title/Abstract]) OR weather changes[Title/Abstract]) OR ("Hot Temperature"[Mesh] AND "Cold Temperature"[Mesh])) OR air humidity[Title/Abstract])) AND (("Epidemiology"[Mesh]) OR tendanc*[Title/Abstract]) OR incidence[Title/Abstract]) OR prevalenc*[Title/Abstract]) OR progress*[Title/Abstract]) OR frequenc*[Title/Abstract]) OR outbreak[Title/Abstract]) OR outbreak*[Title/Abstract]) OR eclosion*[Title/Abstract]) OR surveill*[Title/Abstract]) OR control*[Title/Abstract]) OR observ*[Title/Abstract])) AND (("emerging infectious"[Title/Abstract] OR "Infection enterique"[Title/Abstract] OR "infection entériques"[Title/Abstract] OR "infection hydrique"[Title/Abstract] OR "infection hybrides"[Title/Abstract] OR "Infection alimentaire"[Title/Abstract] OR "infection alimentaires"[Title/Abstract] OR "Vectorborne disease"[Title/Abstract] OR "Vectorborne diseases"[Title/Abstract] OR "Vector borne disease"[Title/Abstract] OR "Vector borne diseases"[Title/Abstract] OR "Waterborne disease"[Title/Abstract] OR "waterborne diseases"[Title/Abstract] OR "water borne disease"[Title/Abstract] OR "water borne diseases"[Title/Abstract] OR "Zoonotic disease"[Title/Abstract] OR "zoonotic diseases"[Title/Abstract] OR "Food borne disease"[Title/Abstract] OR "Food borne diseases"[Title/Abstract] OR "Foodborne disease"[Title/Abstract] OR "Foodborne diseases"[Title/Abstract] OR Enteric*[Title/Abstract] OR Giardia*[Title/Abstract] OR Cryptosporid*[Title/Abstract] OR Yersinios*[Title/Abstract] OR Campylobacter*[Title/Abstract] OR Salmonel*[Title/Abstract] OR escherichia coli[Title/Abstract])))) Sort by: Relevance (207 Résultats)

Medline Search terms used: campylobacter campylobacter campylobacter infections campylobacter jejunicattle diseases climate climate change cryptosporidiosis cryptosporidium culture media diarrhea disease disease outbreaks éclosions enteric enteric disease enteritis enterobacteriaceae epidemiology escherichia coli foodborne diseases gastroenteritis giardia lamblia giardiasis greenhouse effect incidence intestinal diseases outbreak parasites poultry prevalence salmonella salmonella infections salomonellosis tendency water microbiology water supply waterborn waterborn disease zoonoses (154 articles).

Annexe 4

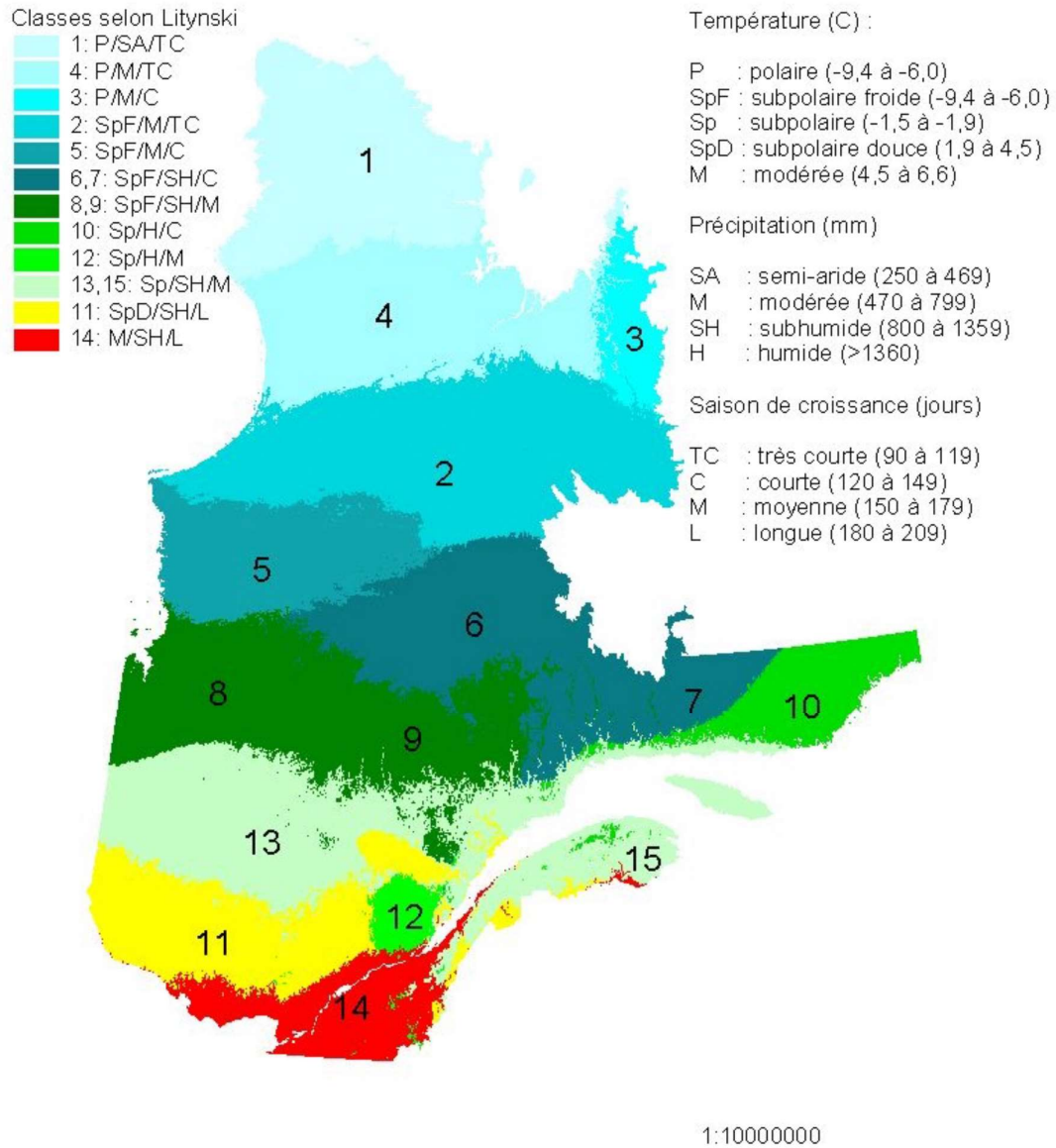


Figure 3: Classification de Litynski appliquée au climat du Québec (65)

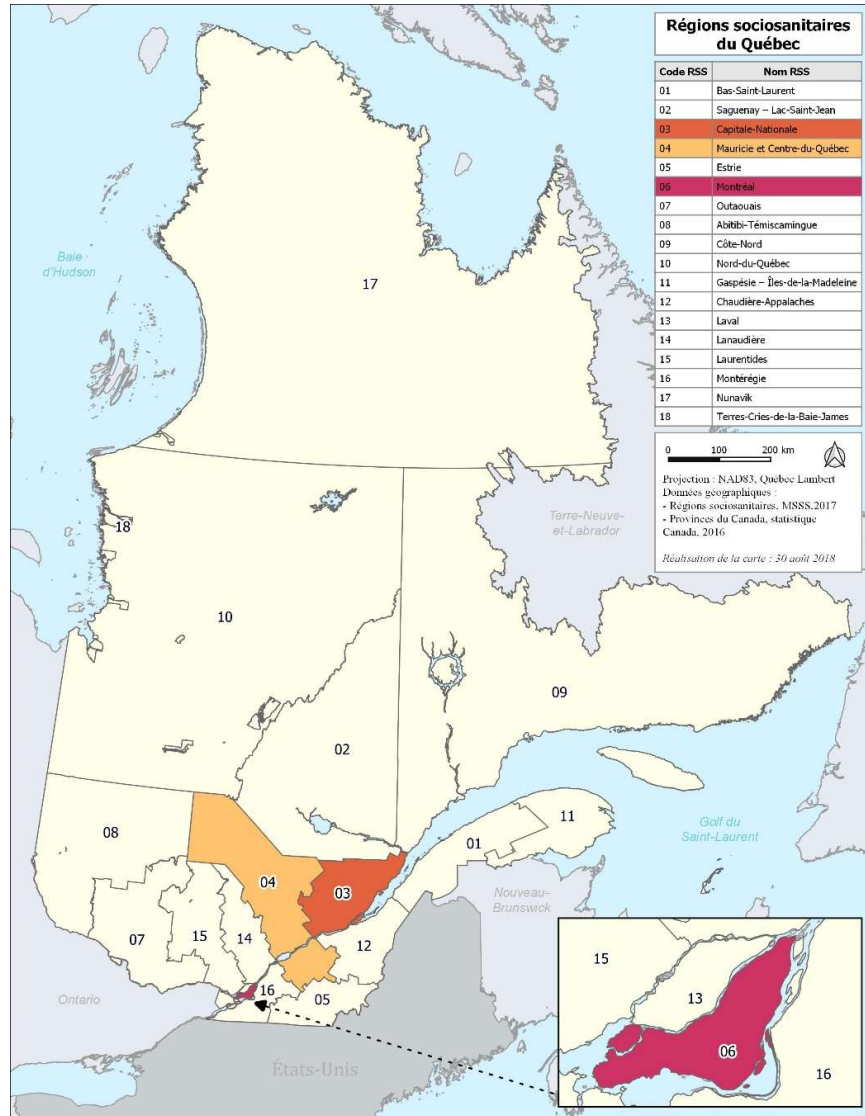


Figure 4: Limites des régions sociosanitaires du Québec (70)

Annexe 6

Tableau IV : Regroupement des dix-huit régions sociosanitaires en quatre zones climatiques

Zones	Classes de Litynski	RSS inclus (numéro)	Description		
			Température moyennes/an (c)	Précipitations totales annuelles (mm)	Durée saison de croissance/an (jours)
Polaire	1-2-3-4	Nunavik (17)	Variable entre -9,4 et -6,0	Prédominance modérée 470 à 799 Quelques régions semi-arides 250 à 469	Prédominance très courte 90 à 119
Subpolaire froide	5-6-7-8-9-10	Saguenay-Lac-Saint-Jean (2) Capitale Nationale (3) Côte-Nord (9) Nord-du-Québec (10) Terre-crie-de-la-Baie-James (18)	Variable entre -9,4 et -6,0	Prédominance Modérée 470 à 799 et Subhumide 800 à 1359	Prédominance courte Entre 120 à 149
Subpolaire	12-13-15	Bas-Saint-Laurent (1) Mauricie-et-Centre-du-Québec (4) Abitibi-Témiscamingue (8) Gaspésie-îles-de-la-Madeleine (11)	Variable entre -1,5 et -1,9	Prédominance Subhumide 800 à 1359	Moyenne entre 150 et 179
Subpolaire douce et Modérée	11 et 14	Estrie (5) Montréal (6) Outaouais (7) Chaudières-Appalaches (12) Laval (13) Lanaudière (14) Laurentides (15) Montérégie (16)	Variable entre 1,9 et 6,6	Subhumide 800 à 1359	Longue de 180 à 209