

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET MALADIES INFECTIEUSES

LES SOLUTIONS



RÉDACTEUR INVITÉE : D^{re} COURTNEY HOWARD

ÉDITORIAL

Les effets du changement climatique sur la santé : Découvrez les risques et faites partie de la solution

126

APERÇUS

Prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques

141

Utilisation de données satellites dans le but de prédire et détecter les éclosions de maladies infectieuses

148

PROCHAIN NUMÉRO LE 6 JUIN 2019



RMTC

RELEVÉ DES MALADIES TRANSMISSIBLES AU CANADA

Le *Relevé des maladies transmissibles au Canada* (RMTC) est une revue scientifique bilingue révisée par les pairs et en accès libre publié par l'Agence de la santé publique du Canada (ASPC). Il fournit des informations pratiques et fiables aux cliniciens et aux professionnels de la santé publique ainsi qu'aux chercheurs, aux décideurs politiques, aux enseignants, aux étudiants et aux autres personnes qui s'intéressent aux maladies infectieuses.

Le comité de rédaction du RMTC est composé de membres en provenance du Canada, des États-Unis, de l'Union européenne et de l'Australie. Les membres du conseil sont des experts reconnus dans le monde entier et actifs dans les domaines des maladies infectieuses, de la santé publique et de la recherche clinique. Ils se rencontrent quatre fois par année et fournissent des avis et des conseils à la rédactrice scientifique en chef du RMTC.

Bureau de la rédaction

Rédactrice scientifique en chef

Patricia Huston, M.D., M.S.P.

Éditrice scientifique associée

Erika Bontovics, MD, FFPH(UK), CIC
Catherine Allen-Ayodabo MD, MPH

Responsable de la production

Lyal Saikaly

Assistant à la rédaction

Laura Rojas Higuera

Soutien web

Liang (Richard) You

Révisseuse

Joanna Odrowaz-Pieniazek
Pascale Salvatore
Laura Stewart-Davis

Références Photographiques

Une approche novatrice pour répondre aux effets des changements climatiques sur la santé est la prédiction et détection précoce des éclosions de maladies infectieuses.

Une façon de s'y prendre est par l'utilisation de données satellites.

Ceci est une photo de Shutterstock avec des éléments de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), adaptée par Lyal Saikaly.

(<https://www.shutterstock.com/image-illustration/satellite-orbiting-around-earth-elements-this-238055446>)

Membre du comité de rédaction du RMTC

Heather Deehan, infirmière autorisée,
B. Sc, MHSc

Centre du vaccin, Division des
approvisionnements UNICEF
Copenhagen, Danemark

Michel Deilgat, C.D., M.D., M.A.P.,
CCPE

Centre des maladies infectieuses
d'origine alimentaire,
environnementale et zoonotique
Agence de la santé publique du
Canada, Ottawa, Canada

Jacqueline J Gindler, M.D.

Centre de prévention et de contrôle
des maladies
Atlanta, États-Unis

Judy Greig, R.N., B. Sc., M. Sc.

Laboratoire de lutte contre les
zoonoses d'origine alimentaire
Agence de la santé publique du
Canada, Guelph, Canada

Richard Heller, B.M. B.C., M.D., FRCP
Universités de Manchester,
Royaume-Uni et Newcastle, Australie

Rahul Jain, M.D., CCMF, MScCh
Department of Family and Community
Medicine (département de médecine
familiale et communautaire)
l'Université de Toronto et le
Sunnybrook Health Sciences Centre,
Toronto, Canada

Jennifer LeMessurier, Résidente,
Santé publique et médecine
préventive, Université d'Ottawa,
Ottawa, Canada

Caroline Quach, M.D., M. Sc, FRCPC,
FSHEA

Microbiologiste-infectiologue
pédiatrique, Centre hospitalier
universitaire Sainte-Justine et
Université de Montréal

Rob Stirling, M.D., M. Sc., MHSc.,
FRCPC

Centre de l'immunisation et des
maladies respiratoires infectieuses
Agence de la santé publique du
Canada, Toronto, Canada

Contactez-le bureau de la rédaction

phac.ccdr-rmtc.aspc@canada.ca
613.301.9930



CHANGEMENT CLIMATIQUE ET MALADIES INFECTIEUSES LES SOLUTIONS

TABLE DES MATIÈRES

ÉDITORIAL

Les effets du changement climatique sur la santé :
Découvrez les risques et faites partie de la solution 126
C Howard, P Huston

APERÇUS

Stratégie d'évaluation des risques servant à la détection
précoce et à la prédiction des éclosions de maladies
infectieuses associées aux changements climatiques 132
*EE Rees, V Ng, P Gachon, A Mawudeku, D McKenney,
J Pedlar, D Yemshanov, J Parmely, J Knox*

Prédictions des éclosions de maladies transmises par les
moustiques selon les prévisions météorologiques
au Canada 141
NH Ogden, LR Lindsay, A Ludwig, AP Morse, H Zheng, H Zhu

Utilisation des images d'observation de la terre pour
améliorer la cartographie des risques de
maladies associées au changement climatique 148
SO Kotchi, C Bouchard, A Ludwig, E Rees, S Brazeau

L'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses
et l'adaptation aux changements climatiques 159
*G Germain, A Simon, J Arsenault, G Baron, C Bouchard,
D Chaumont, F El Allaki, A Kimpton, B Lévesque, A Massé,
M Mercier, N Ogden, I Picard, A Ravel, JP Rocheleau,
J Soto pour l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses
et l'adaptation aux changements climatiques*



Les effets du changement climatique sur la santé : Découvrez les risques et faites partie de la solution

C Howard^{1,2*}, P Huston³

Résumé

Le changement climatique représente une menace claire et immédiate pour la santé humaine. Les répercussions sur la santé sont déjà observables au Canada, qui se réchauffe environ deux fois plus vite que la moyenne mondiale. Le *Rapport sur l'écart entre les besoins et les perspectives en matière de réduction des émissions, récemment* publié par les Nations Unies, indique que si les pays maintiennent leurs efforts actuels en matière d'émissions, les émissions dépasseront les objectifs fixés dans l'Accord de Paris et le réchauffement climatique dépassera 2 °C mondialement. L'augmentation des risques pour la santé est une conséquence importante du réchauffement planétaire. Il est possible de prévenir et atténuer les effets des changements climatiques sur la santé, et l'identification et diffusion de ces stratégies constituent l'une des meilleures incitations à l'action. Cet éditorial présente un aperçu de certaines des initiatives mondiales et nationales en cours pour réduire les émissions et s'attaquer aux risques pour la santé du changement climatique en général, et met en lumière certaines des initiatives nationales en cours pour atténuer le risque accru de maladies infectieuses plus particulièrement au Canada.

Citation suggérée : Howard C, Huston P. Les effets du changement climatique sur la santé : Découvrez les risques et faites partie de la solution. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(5):126–31. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v45i05a01f>

Mots-clés : Changement climatique, effets sur la santé, maladies transmissibles, résilience, adaptation, prévention, émissions, éco-anxiété, deuil écologique, maladies transmises par les moustiques, surveillance

Introduction

L'Organisation mondiale de la Santé a déclaré que « le changement climatique est le plus grand défi du 21^e siècle, et menace tous les aspects de la société dans laquelle nous vivons » (1). Pour s'attaquer à ce défi, 175 pays ont ratifié l'*Accord de Paris* de la *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* (2). Collectivement, ces pays ont convenu de limiter l'augmentation moyenne de la température mondiale bien en deçà de 2 °C, et de continuer les efforts pour limiter l'augmentation à 1,5 °C. Le Canada est un des signataires de l'Accord de Paris et s'est engagé à réduire les émissions de 30 % des niveaux de 2005 d'ici 2030. Malheureusement, les émissions du Canada en 2016 ont en fait augmenté par rapport à 1990 (3). Bien que certains pays aient réalisé de grands progrès (notamment le Royaume-Uni et la Chine), le *Rapport sur l'écart entre les besoins et les perspectives en matière de réduction des émissions* de 2018 indique que si tous les pays maintiennent leurs efforts actuels en matière d'émissions, les émissions dépasseront les objectifs fixés dans l'Accord de Paris et le réchauffement planétaire dépassera 2 °C dans le monde (4).

Pour répondre au besoin de réduire les émissions et bâtir la résilience du climat, le gouvernement du Canada, après de vastes consultations avec les provinces, les territoires et les peuples autochtones, a élaboré un plan national sur les changements climatiques. Le *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques* a été adopté par la plupart des premiers ministres canadiens en décembre 2016 (5). Le *Cadre* indique que les preuves sont claires : les activités humaines entraînent des changements sans précédent dans le climat de la Terre, qui créent des risques importants pour les communautés, la santé humaine, la sécurité, la croissance économique et l'environnement naturel. Il indique que les effets des changements climatiques sont déjà évidents, car on a déjà documenté l'érosion côtière, le dégel du pergélisol, l'arrivée de maladies antérieurement confinées à des climats plus chauds, les augmentations des vagues de chaleur, des sécheresses et des inondations, de même que des risques aux infrastructures essentielles et à la sécurité alimentaire (5). Le plan pour remédier à cet état de choses au Canada s'articule autour de quatre piliers : tarification de la pollution par le carbone, mesures complémentaires pour réduire les émissions dans tous les secteurs,

Cette oeuvre est mise à la disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0



Affiliations

¹ Ministère de la Santé et des Services sociaux, Territoires du Nord-Ouest

² Canadian Association of Physicians for the Environment, Toronto, Ontario

³ Direction générale de la prévention et du contrôle des maladies infectieuses, Agence de la santé publique du Canada, Ottawa, Ontario

*Correspondance :
courtghoward@gmail.com



adaptation et résilience et technologies propres, innovation et emplois. Le Cadre comprend plus de 50 mesures et positions concrètes par lesquelles le Canada a l'intention de respecter les objectifs de réduction des gaz à effet de serre auxquels il s'est engagé dans l'Accord de Paris. Par exemple, des systèmes de tarification de la pollution par le carbone et des points de référence ont été établis partout au Canada.

Bien que les rapports annuels sur ce Cadre pancanadien aient documenté d'importants progrès (6), il existe encore un écart entre la situation actuelle et celle que nous devons atteindre pour que le Canada réalise ses objectifs. Le récent *Rapport sur les changements climatiques au Canada* de 2019 produit par Environnement et Changement climatique Canada, indique que le Canada se réchauffe deux fois plus vite que la moyenne mondiale, et que l'Arctique canadien se réchauffe en moyenne trois fois plus vite que le reste de la planète (7). Par exemple, la région du Delta McKenzie est déjà 3 °C plus chaude que dans les années 1950 (8).

Les effets du changement climatique sur la santé

Le respect de nos engagements sur les émissions n'est pas qu'une chose théoriquement souhaitable. Nous devenons de plus en plus conscients que les changements climatiques mènent à de nouvelles menaces pour la santé. Au plan international, des efforts tels que *le Compte à rebours sur la santé et le changement climatique* de Lancet indiquent clairement que certaines des plus importantes menaces à la santé à l'échelle mondiale incluent les effets néfastes liés à la chaleur sur la santé et la productivité au travail, l'aggravation des indicateurs de la sécurité alimentaire et l'intensification des répercussions des maladies transmissibles.

Au Canada, il existe de plus en plus de données probantes sur les menaces à la santé liées au climat. Avec la hausse des températures du nord, la sécurité alimentaire terrestre est menacée pour les populations autochtones (9,10), la sécurité des déplacements sur la glace est réduite et la santé mentale est mise à rude épreuve (11). Les risques à la santé liés au climat partout au Canada comprennent une augmentation des coups de chaleur et de décès attribuables au nombre accru et à la durée des vagues de chaleur (12,13); et les problèmes respiratoires causés par la pollution de l'air résultant des incendies de forêt (14). On s'attend à ce que les incendies de forêt extrêmes continuent à augmenter (7) entraînant des épisodes de pollution atmosphérique grave et des pressions accrues sur les établissements de santé et les prestataires de soins de santé (comme on l'a vu notamment lors de l'évacuation d'urgence de l'hôpital à Fort McMurray en 2016). Dans le même sens, on prévoit une augmentation des inondations, qui comportent leur propre risque de dommages à la propriété et de la perturbation personnelle et sociétale découlant de l'évacuation. Des symptômes d'anxiété et de trouble de stress post-traumatique ont été ressentis par des personnes

affectées par des incendies, des inondations et des phénomènes météorologiques extrêmes (15). De nouvelles expressions telles que l'éco-anxiété et le deuil écologique font maintenant leur entrée dans le vocabulaire (16). Les risques de maladies transmissibles liées au changement climatique au Canada sont décrits dans le numéro d'avril 2019 du *Relevé des maladies transmissibles au Canada* et incluent une augmentation des maladies transmises par les tiques, (17) les maladies endémiques et exotiques transmises par les moustiques (18,19) de même que les maladies d'origine alimentaire (20).

Il est démontré que la compréhension des répercussions des changements climatiques sur la santé est un des meilleurs moyens de motiver l'action (21), et les professionnels de la santé et les scientifiques sont parmi les messagers qui inspirent le plus confiance (22). Dans cet éditorial, nous mettons en lumière certaines initiatives nationales et mondiales récentes pour remédier au changement climatique et à ses effets sur la santé en général, et nous soulignons ensuite le travail lié plus particulièrement aux initiatives visant à minimiser les risques de maladies infectieuses émergentes.

Initiatives mondiales

Le récent *Compte à rebours sur la santé et le changement climatique* de Lancet indique que les professionnels de la santé et les systèmes de santé tiennent de plus en plus compte des effets du changement climatique sur la santé et y réagissent (23). Et pour cause : une meilleure compréhension des répercussions du changement climatique sur la santé permet d'améliorer la préparation, d'accroître la résilience et l'adaptation, et d'accorder priorité aux interventions d'atténuation qui protègent et favorisent le bien-être de l'être humain (23).

L'Organisation mondiale de la Santé travaille à un nouveau rapport intitulé *Stratégie mondiale sur l'environnement, les changements climatiques et la santé* (24). L'ébauche de *Stratégie mondiale* préconise une approche intégrée de la santé publique et de la science environnementale pour accélérer les travaux sur la prévention primaire et promouvoir des politiques qui s'attaquent aux causes premières des menaces de l'environnement pour la santé. Il est prévu que l'Assemblée de la Santé mondiale approuvera cette nouvelle stratégie en mai 2019.

L'adaptation consiste à réduire les effets associés à un niveau donné de changement climatique. En octobre 2018, on a annoncé une nouvelle *Commission mondiale sur l'adaptation* dirigée par l'ancien Secrétaire général des Nations Unies Ban Ki-moon, l'homme d'affaires américain Bill Gates et la directrice générale de la Banque mondiale, Kristalina Georgieva (25). Le rapport démontrera pourquoi l'adaptation aux risques climatiques est essentielle et décrira les actions nécessaires. La Commission présentera son rapport au Sommet sur le climat des Nations Unies en septembre 2019 à New York.



Mondialement, il existe un mouvement de jeunes qui appelle à l'action sur le changement climatique lancé par une activiste suédoise de 16 ans, Greta Thunberg (26). Le 15 mars 2019, 1,5 million de jeunes et leurs supporteurs dans 123 pays ont manifesté partout dans le monde exigeant une réponse importante au changement climatique suivant une lettre ouverte aux dirigeants mondiaux qui déclarait : « Vous nous avez laissé tomber » (27). Rien qu'à Montréal, on a estimé la présence d'environ 150 000 manifestants (28).

Initiatives canadiennes

Les effets du changement climatique sur la santé au Canada ne sont pas sans avoir été remarqués par les professionnels des soins de santé. En février 2019, l'Association médicale canadienne, l'Association des infirmières et des infirmiers du Canada, l'Association canadienne de santé publique, l'Association canadienne des médecins pour l'environnement et le Réseau pour la santé publique urbain ont lancé un appel à l'action, définissant le changement climatique comme une urgence sanitaire (29). La Fédération des étudiants et étudiantes en médecine du Canada et la Fédération internationale des associations d'étudiants en médecine ont toutes deux demandé que la santé climatique commence à être intégrée à l'enseignement médical d'ici la fin de 2020, et qu'elle le soit davantage d'ici 2025 (30). Sans cet enseignement, les professionnels de la santé ne seront pas préparés aux problèmes de santé liés au climat qu'ils sont susceptibles de voir fréquemment dans leurs pratiques au cours des années à venir.

Le Canada est en voie d'éliminer l'énergie au charbon d'ici 2030, une politique qui devrait produire 1,3 milliard de dollars en bénéfices sanitaires et environnementaux attribuables à une meilleure qualité de l'air (31). Le Canada a maintenant cofondé l'Alliance : Énergiser au-delà du charbon avec le Royaume-Uni dans le but de catalyser les efforts internationaux (32) qui pourraient multiplier ces avantages pour la santé. Dans le même sens, le nouveau Guide alimentaire du Canada, avec son accent sur une diète riche en plantes, est susceptible d'entraîner une réduction des émissions de gaz à effet de serre résultant de la production et de la consommation d'aliments composés de viande. Tout cela correspond aux recommandations de la EAT-Lancet Commission qui en décrit les avantages sanitaires tant pour l'être humain que pour la planète (33,34).

De grands changements sont également possibles au niveau communautaire. En ce qui concerne le transport durable, les médecins et les praticiens de la santé publique encouragent davantage une infrastructure de transport actif dans de multiples collectivités pour réduire les taux d'émissions et améliorer la santé (35). L'engagement de Vancouver à devenir l'une des villes les plus durables au monde contient plusieurs éléments visant à augmenter les niveaux d'activités physique et diminuer

la pollution (36). Faire sortir les gens des voitures alimentées par des combustibles fossiles et leur faire utiliser des modes de transport durables comme les bicyclettes et les autobus réduit non seulement les émissions, mais réduit également la pollution de l'air locale, améliore les niveaux d'activité et réduit les maladies.

S'attaquer aux risques accrus de maladies infectieuses

Dans ce numéro du Relevé des maladies transmissibles au Canada, vous lirez comment le gouvernement et les chercheurs universitaires du Canada ont trouvé des solutions pour remédier aux risques accrus de maladies transmissibles résultant du changement climatique. Un des principaux éléments s'est avéré être les stratégies de détection précoce et de prévention. Rees *et al.* décrivent une nouvelle génération de stratégies de surveillance pour la prédiction et la détection précoce d'éclotions de maladies transmissibles liées au climat, notamment la modélisation des risques et la surveillance basée sur des événements qui utilisent des données Internet de source ouverte, lesquelles ont récemment été améliorées par des applications d'intelligence artificielle, comme l'apprentissage automatique (37). Ogden *et al.* soulignent que comme le réchauffement, la variabilité climatique et les événements météorologiques extrêmes entraînent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des maladies transmises par les moustiques, la compréhension des schémas météorologiques connexes peut faciliter la découverte précoce du moment où une région devient à risque. Des informations opportunes sur une éclosion imminente peuvent permettre la mise en œuvre de mesure de contrôle des moustiques et de communication du risque — avant que l'éclosion ne se produise (38). Kotchi *et al.* remarquent par ailleurs que les images de satellite peuvent fournir des données sur les indicateurs des déterminants environnementaux et climatiques qui influencent la présence et le développement des maladies transmises par les moustiques et les tiques. Ainsi, les données sur les changements de la température, de l'humidité, de la couverture végétale et bien plus encore peuvent servir à prédire des éclotions de maladies transmissibles. Des travaux sont désormais en cours pour augmenter la prévisibilité de cette technique en utilisant les données de multiples satellites et en appliquant des techniques novatrices d'apprentissage automatique pour traiter les mégadonnées (39). Germain *et al.* décrivent un nouveau modèle de collaboration entre les experts scientifiques et les décideurs de politiques publiques de la province de Québec dans une structure organisationnelle « Un monde, une santé » qui offre une plateforme pour le partage des connaissances, l'établissement de consensus et le développement de stratégies d'adaptation pour remédier au risque accru de maladies zoonotiques associées au changement climatique (40).



Discussions et conclusion

Un [sondage mené par Ipsos-Reid en décembre 2018](#) a démontré que la majorité des Canadiens reconnaissent que le Canada a besoin de faire plus d'efforts pour s'attaquer au changement climatique (41). Cependant la sensibilisation sur les effets du changement climatique sur la santé n'est pas encore aussi étendue. Il est important que tous les Canadiens sachent que le changement climatique affecte de plus en plus la santé de nombreuses manières. Les praticiens de soins de santé et de santé publique jouent un rôle important pour sensibiliser davantage le public sur ces risques à la santé liés au changement climatique. Un message positif peut être diffusé : une meilleure compréhension des effets du changement climatique sur la santé permet une meilleure préparation, une meilleure résilience et une meilleure adaptation, et l'élaboration de stratégies qui protègent et favorisent la santé humaine. Il y a beaucoup de travaux en cours pour remédier aux effets du changement climatique sur la santé dans le contexte de l'adaptation. Ces travaux sont axés sur la préparation, la prévention et la résilience. Ils comprennent une toute nouvelle génération de stratégies permettant de détecter quand nous courons un risque accru de maladies infectieuses liées au climat.

Les praticiens de soins de santé et de santé publique doivent être prêts à jouer un rôle actif dans la prévention, la détection précoce et l'atténuation des effets du changement climatique sur la santé. À cette fin, le contenu climat et santé doit être de plus en plus inclus dans les plans de cours et les cours de formation continue. Les effets nuisibles de la pollution de l'air et les effets traumatisants des phénomènes météorologiques extrêmes sont évidents et bien documentés. Par ailleurs, les effets du changement climatique sur les maladies transmissibles émergentes au Canada sont moins évidents et moins connus. Afin de ne pas rater l'apparition de maladies à transmission

vectorielle induites par le changement climatique chez les personnes touchées, il faut de toute nécessité un indice élevé de suspicion et une confirmation en laboratoire. La compréhension et l'information opportune sur les nouvelles stratégies pour la détection précoce des risques et des éclosions de maladies émergentes susceptibles d'être induites par un changement climatique aideront les professionnels des soins de santé et de santé publique à se préparer et à réagir.

La connaissance des risques et le désir de faire partie des solutions sont des réactions saines au changement climatique. On fait beaucoup en ce moment et chaque professionnel des soins de santé peut faire beaucoup pour créer un avenir viable pour les générations actuelles et futures. Et cet effort en vaut la peine pour maintenir un état de préparation et de résilience individuelle, familiale et communautaire, pour contribuer à une chose plus grande que soi et aussi parce que le regard du monde est posé sur nous.

Déclaration des auteurs

Les deux auteurs ont élaboré la conception générale et la création de l'éditorial. PH a rédigé la première ébauche et CH et PH ont collaboré aux ébauches et aux révisions ultérieures.

D^{re} Courtney Howard est présidente de l'Association des médecins pour l'environnement D^{re} Patricia Huston est rédactrice en chef du Rapport canadien sur les maladies transmissibles au Canada et elle s'est récusée de toute décision rédactionnelle relative au présent manuscrit. Les décisions ont été prises par le rédacteur invité du numéro d'avril 2019, le D^r Nicholas Ogden.

Conflit d'intérêts

Aucun.



Références

1. Campbell-Lendrum D, Wheeler N, Maiero M, Villalobos Prats E, Nevelle T. World Health Organization COP24 Special Report on Health and Climate Change. World Health Organization; 2018. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/WHO%20COP24%20Special%20Report_final.pdf
2. Nations Unies. Accord de Paris 2015. https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf
3. Gouvernement du Canada. Émissions de gaz à effet de serre. 2018 (Accédé 2019-04-18). <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html>
4. United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2018. http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26895/EGR2018_FullReport_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y
5. Gouvernement du Canada. Cadre Pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques. http://publications.gc.ca/collections/collection_2017/eccc/En4-294-2016-fra.pdf
6. Environnement et changement climatique Canada. Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques : Deuxième rapport annuel synthèse de la mise en oeuvre — Décembre 2018. Gouvernement du Canada. http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/En1-77-2018-fra.pdf
7. Bush E, Lemmen DS, editors. Rapport sur le climat changeant du Canada 2019; Gouvernement du Canada, Ottawa, ON. 446 p. https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/RCCC_FULLREPORT-FR-FINAL.pdf
8. Government of the Northwest Territories. Climate Observations in the Northwest Territories (1957-2012) Inuvik * Norman Wells * Yellowknife * Fort Smith. Environment and Natural Resources. https://www.enr.gov.nt.ca/sites/enr/files/page_3_nwt-climate-observations_06-13-2015_vf_1_0.pdf
9. Rosol R, Powell-Hellyer S, Chan HM. Impacts of decline harvest of country food on nutrient intake among Inuit in Arctic Canada: impact of climate change and possible adaptation plan. *Int J Circumpolar Health* 2016 Jul;75(1):31127. DOI PubMed
10. Berry P, Clarke K, Fleury MD, Parker S. « Santé humaine », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Gouvernement du Canada; 2014. P. 191-232. https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2014/pdf/Chapitre7-Sante-humaine_Fra.pdf
11. Cunsolo Willox A, Harper SL, Ford JD, Landman K, Houle K, Edge VL; Rigolet Inuit Community Government. "From this place and of this place:" climate change, sense of place, and health in Nunatsiavut, Canada. *Soc Sci Med* 2012 Aug;75(3):538-47. DOI PubMed
12. Dover GP, Gould R, Hayes J, Kenny G, Moore K, Mowat D, Nobbe S, Payne L, Petrucka P. Lignes directrices à l'intention des travailleurs de la santé pendant les périodes de chaleur accablante : Un guide technique, 2018. 2018-08-07. No de catalogue : H128-1/11-642F. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/changement-climatique-sante/lignes-directrices-intention-travailleurs-sante-pendant-periodes-chaleur-accablante-guide-technique.html>
13. Demers I, Gosselin P. Pollens, climat et allergies : initiatives menées au Québec Promotion de la santé et prévention des maladies chroniques au Canada 2019;39 (4) 149-54. DOI
14. Henderson SB, Johnston FH. Measures of forest fire smoke exposure and their associations with respiratory health outcomes. *Curr Opin Allergy Clin Immunol* 2012 Jun;12(3):221-7. DOI PubMed
15. Health A. Impact of Wildfires on the Mental Health of Fort McMurray Residents: Neurotic Disorders, Daily Physician Visits within an Emergency Department 2015 vs. 2016. Alberta Health, Health Standards, Quality and Performance Division, Analytics and Performance Reporting Branch, 2016.
16. Cunsolo A, Ellis N. Ecological grief as a mental health response to climate change-related loss. *Nat Clim Chang* 2018;8(4):275-81. DOI
17. Bouchard C, Dibernardo A, Koffi J, Wood H, Leighton PA, Lindsay LR. Augmentation du risque de maladies transmises par des tiques en raison des changements climatiques et environnementaux. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019 45(4):89-98. DOI
18. Ludwig A, Zheng H, Vrbova L, Drebot MA, Iranpour M, Lindsay LR. Augmentation du risque de maladies endémiques transmises par des moustiques au Canada en raison du changement climatique. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(4):99-107. DOI
19. Ng V, Rees EE, Lindsay LR, Drebot MA, Brownstone T, Sadeghieh T, Khan SU. Les changements climatiques pourraient-ils entraîner la propagation de maladies exotiques transmises par les moustiques au Canada? *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(4):108-18. DOI
20. Smith BA, Fazil A. Quelles seront les répercussions des changements climatiques sur les maladies microbiennes d'origine alimentaire au Canada? *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(4):119-25. DOI
21. Myers T, Nisbet M, Maibach E, Leiserowitz A. A public health frame arouses hopeful emotions about climate change. *Clim Change* 2012;113(3-4):1105-12. DOI
22. Firefighters and Nurses Top List of Canada's Most Trusted Professionals. March 15, 2018. Insights West. <https://insightswest.com/news/firefighters-and-nurses-top-list-of-canadas-respected-professionals/>
23. Watts N, Amann M, Arnell N, Ayeb-Karlsson S, Belesova K, Berry H, Bouley T, Boykoff M, Byass P, Cai W, Campbell-Lendrum D, Chambers J, Daly M, Dasandi N,



- Davies M, Depoux A, Dominguez-Salas P, Drummond P, Ebi KL, Ekins P, Montoya LF, Fischer H, Georgeson L, Grace D, Graham H, Hamilton I, Hartinger S, Hess J, Kelman I, Kieseewetter G, Kjellstrom T, Kniveton D, Lemke B, Liang L, Lott M, Lowe R, Sewe MO, Martinez-Urtaza J, Maslin M, McAllister L, Mikhaylov SJ, Milner J, Moradi-Lakeh M, Morrissey K, Murray K, Nilsson M, Neville T, Oreszczyn T, Owfi F, Pearman O, Pencheon D, Pye S, Rabhaniha M, Robinson E, Rocklöv J, Saxer O, Schütte S, Semenza JC, Shumake-Guillemot J, Steinbach R, Tabatabaei M, Tomei J, Trinanes J, Wheeler N, Wilkinson P, Gong P, Montgomery H, Costello A. The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come. *Lancet* 2018 Dec;392(10163):2479–514. DOI PubMed
24. World Health Organization. Draft WHO global strategy on health, environment and climate change. 2018. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0003/378903/68id07e_GlobalStrategyHealthEnvironmentClimateChange_180547.pdf?ua=1
 25. Global Center on Adaptation. Global Commission on Adaptation. <https://gca.org/global-commission-on-adaptation>
 26. The Lancet Planetary Health. Power to the children. *Lancet Planet Health* 2019 Mar;3(3):e102. DOI PubMed
 27. Youth climate change strikers. Open letter to world leaders. *The Guardian* March 1, 2019. www.theguardian.com/environment/2019/mar/01/youth-climate-change-strikers-open-letter-to-world-leaders
 28. Stevenson V. Tens of thousands rally in Montreal as part of international “school strike” against climate change. *CBC News* March 15, 2019. <https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/climate-march-montreal-1.5058083>
 29. Appel à l’Action concernant le Changement Climatique et la Santé : des professionnels de la santé du Canada aux partis politiques fédéraux du Canada. Feb 5, 2019. <https://cape.ca/wp-content/uploads/2019/02/Appel-%C3%A0-l%E2%80%99Action-concernant-le-Changement-Climatique-et-la-Sant%C3%A9-Feb-5-2019-FINAL.pdf>
 30. International Federation of Medical Students’ Associations. 2020 Vision for Climate-Health in Medical Curricula 2018 (Accessed 2018-10-09). <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeMxig6Yhs4qJU8oboKXm0KqGXRj64fcs08o9IHBikNGX5RYA/viewform>
 31. Gouvernement du Canada. Résumé de l’étude d’impact de la réglementation : Règlement modifiant le Règlement sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone — secteur de l’électricité thermique au charbon. Ministère de l’Environnement et Ministère de la Santé, 17 février 2018. <http://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2018/2018-02-17/html/reg3-fra.html>
 32. Government of the United Kingdom. Powering Past Coal Alliance: Partners. 2018. <https://www.gov.uk/government/publications/powering-past-coal-alliance-declaration/powering-past-coal-alliance-partners>
 33. Santé Canada. Guide alimentaire canadien. 2019. <https://guide-alimentaire.canada.ca/fr/>
 34. Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F, Wood A, Jonell M, Clark M, Gordon LJ, Fanzo J, Hawkes C, Zurayk R, Rivera JA, De Vries W, Majele Sibanda L, Afshin A, Chaudhary A, Herrero M, Agustina R, Branca F, Lartey A, Fan S, Crona B, Fox E, Bignet V, Troell M, Lindahl T, Singh S, Cornell SE, Srinath Reddy K, Narain S, Nishtar S, Murray CJL. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet* 2019 Feb;393(10170):447–92. DOI PubMed
 35. Celis-Morales CA, Lyall DM, Welsh P, Anderson J, Steell L, Guo Y, Maldonado R, Mackay DF, Pell JP, Sattar N, Gill JMR. Association between active commuting and incident cardiovascular disease, cancer, and mortality: prospective cohort study. *BMJ* 2017 Apr;357:j1456. DOI PubMed
 36. City of Vancouver Greenest City Action Plan. <https://vancouver.ca/files/cov/Greenest-city-action-plan.pdf>
 37. Rees EE, Ng V, Gachon P, Mawudeku A, McKenney D, Pedlar J, Yemshanov D, Parmely J, Knox J. Stratégie d’évaluation des risques servant à la détection précoce et à la prédiction des éclosions de maladies infectieuses associées aux changements climatiques. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(4):132–40. DOI
 38. Ogden NH, Lindsay LR, Ludwig A, Morse AP, Zheng H, Zhu H. Prédiction d’éclosions de maladies transmises par les moustiques fondées sur les pronostics météorologiques au Canada. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(5):141–7. DOI
 39. Kotchi SO, Bouchard C, Ludwig A, Rees EE, Brazeau S. Utilisation des images d’observation de la terre pour améliorer la cartographie des risques de maladies associées au changement climatiques. *Relevé des maladies transmissibles au Canada*, 2019;45(5):148–58. DOI
 40. Germain G, Simon A, Arsenault J, Baron G, Bouchard C, Chaumont D, El Allaki F, Kimpton A, Lévesque B, Massé A, Mercier M, Ogden NH, Picard I, Ravel A, Rocheleau JP, Soto J, pour l’Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l’adaptation aux changements climatiques. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(5):159–64. DOI
 41. Ipsos Game Changers. Three Quarters (75%) Say Canada Needs to Do More to Address Climate Change. <https://www.ipsos.com/en-ca/news-polls/three-quarters-75-percent-say-canada-needs-to-do-more-to-address-climate-change>



Stratégie d'évaluation des risques servant à la détection précoce et à la prédiction des éclosions de maladies infectieuses associées aux changements climatiques

EE Rees^{1*}, V Ng², P Gachon³, A Mawudeku⁴, D McKenney⁵, J Pedlar⁵, D Yemshanov⁵, J Parmely⁶, J Knox^{1,2}

Résumé

Une nouvelle gamme de stratégies de surveillance visant à détecter les infections émergentes et à reconnaître les risques accrus d'éclosions de maladies infectieuses qui seraient causées par les changements climatiques est en cours de développement. Ces stratégies comportent des systèmes de surveillance événementielle et la modélisation des risques. Les systèmes de surveillance événementielle font appel à des données Internet à code source libre, comme des rapports officiels ou des médias, et des réseaux sociaux (p.ex. Twitter), pour détecter les signes d'une menace imminente et ils peuvent servir, en association avec les systèmes de surveillance traditionnels, à faciliter l'émission d'avis précoces de menace pour la santé publique. Depuis quelque temps, ces systèmes comprennent des applications d'intelligence artificielle, comme l'apprentissage automatique et le traitement des langues naturelles, qui accroissent la rapidité, la capacité et l'exactitude du filtrage, du classement et de l'analyse des données Internet portant sur la santé. La modélisation des risques recourt à des méthodes statistiques et mathématiques pour évaluer la gravité de l'émergence d'une maladie et pour diffuser certains facteurs portant sur l'hôte (p.ex. le nombre de cas signalés), le pathogène (p.ex. la pathogénicité) et l'environnement (p.ex. si le climat est propice aux espèces réservoirs). On élargit les types de données de ces modèles en vue d'y inclure les renseignements sur la santé tirés de données Internet à code source libre et l'information sur les tendances des êtres humains et des biens en matière de mobilité. Ces renseignements contribuent à cerner les populations à risque et à prédire par quelles voies les infections pourraient se répandre dans de nouvelles régions et de nouveaux pays. Outils très efficaces complétant les stratégies traditionnelles de surveillance qui déterminent ce qui s'est déjà produit, les systèmes de surveillance événementielle et la modélisation des risques devraient servir de plus en plus à éclairer les mesures de santé publique visant à prévenir, à détecter et à contrôler les hausses de cas de maladies infectieuses causées par les changements climatiques.

Citation suggérée : Rees EE, Ng V, Gachon P, Mawudeku A, McKenney D, Pedlar J, Yemshanov D, Parmely J, Knox J. Stratégie d'évaluation des risques servant à la détection précoce et à la prédiction des éclosions de maladies infectieuses associées aux changements climatiques. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(5):132–40. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v45i05a02f>

Mots-clés : changements climatiques, évaluation des risques, systèmes de surveillance événementielle, intelligence artificielle, apprentissage automatique, traitement des langues naturelles, modélisation des risques

Introduction

Le réchauffement climatique tend à accélérer depuis quelques décennies. En effet, durant la période de 1850 à 2017, les neuf années les plus chaudes ont toutes été observées au cours des douze dernières années. Au total, la température annuelle moyenne de l'atmosphère a augmenté d'environ 0,97 °C entre 1880 et 2017 (1). Aussi infime soit-il, cet accroissement de la température moyenne mondiale est la cause de changements importants dans le climat planétaire et il produit des effets non moins importants sur la société : la hausse du niveau de la mer (et l'érosion qu'elle

Cette oeuvre est mise à la disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0



Affiliations

¹ Division des sciences des risques pour la santé publique, Laboratoire national de microbiologie, Agence de la santé publique du Canada, Saint-Hyacinthe (Québec)

² Division des sciences des risques pour la santé publique, Laboratoire national de microbiologie, Agence de la santé publique du Canada, Guelph (Ontario)

³ Centre pour l'étude et la simulation du climat à l'échelle régionale (ESCIER), Université du Québec à Montréal (UQAM), Montréal (Québec)

⁴ Bureau de la connaissance de la situation et des opérations, Centre de mesures et d'interventions d'urgence, Agence de la santé publique du Canada, Ottawa (Ontario)

⁵ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ontario)

⁶ Réseau canadien pour la santé de la faune, Université de Guelph, Guelph (Ontario)

*Correspondance :
erin.rees@canada.ca



provoque) et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations, des sécheresses (et les incendies et les mauvaises récoltes qu'elles causent) et des épisodes de pluie verglaçante (2). Fait qui revêt une importance particulière pour le Canada, le réchauffement climatique est encore plus sensible sous les hautes latitudes et pendant l'hiver (3). En effet, depuis 70 ans, la température annuelle moyenne globale au pays a grimpé de 1,8 °C (4) et la température hivernale moyenne, de 3,4 °C (4). Dans certaines parties du Nord-Ouest, cette hausse est encore plus marquée. Étant donné que les changements climatiques influent non seulement sur les températures, mais aussi sur les régimes de précipitations, le Canada a tendance à devenir plus aride dans l'Ouest et plus humide dans l'Est (4).

On sait que les changements de température et de précipitations provoqués par les changements climatiques augmentent les risques de transmission de maladies infectieuses. Les changements climatiques modifient en effet les aires de distribution des vecteurs de maladies (comme les tiques et les moustiques) et des espèces réservoirs (les oiseaux, les rongeurs et les cerfs), qui contribuent à la transmission aux humains d'agents pathogènes infectant les tiques et les moustiques, à mesure que le climat devient plus propice aux vecteurs et aux espèces réservoirs (5,6). Par exemple, la hausse des cas de maladie de Lyme au Canada reflète l'expansion de son vecteur, la tique à pattes noires (*Ixodes scapularis*), dont l'aire de répartition se déplace vers le nord aux États-Unis et couvre désormais aussi le sud du Canada, les changements climatiques ayant rendu le pays plus hospitalier pour les tiques (7,8). Cette expansion dans une région où les vecteurs et les espèces réservoirs peuvent se multiplier se traduit non seulement par la hausse des risques de maladies infectieuses sporadiques, mais aussi par la probabilité accrue que ces vecteurs et les maladies qu'ils transmettent deviennent endémiques (6,9–11).

En outre, les changements climatiques influent sur la mobilité des personnes et des biens. On s'attend à voir une augmentation du nombre de réfugiés climatiques, ces personnes déplacées fuyant les phénomènes météorologiques extrêmes qui menacent leur existence ou leurs moyens de subsistance (11). Ces réfugiés, souvent issus de régions du monde où les maladies infectieuses sont plus répandues et ayant des pratiques et des calendriers de vaccination différents risquent, sans le vouloir, de transmettre ces maladies aux Canadiens (12). Le tourisme, tant dans les pays d'origine que dans les pays de destination, est également touché par les changements climatiques, qui modifient les facteurs antinomiques incitant les touristes à voyager et le potentiel de propagation des maladies (13–15). Sans le vouloir, on risque de transporter des vecteurs et des pathogènes dans le cadre des importations canadiennes par la voie des airs, par la voie terrestre et par bateau (16–18). Comme on le sait, les conteneurs terrestres et maritimes facilitent les invasions de moustiques parce que les larves peuvent se développer dans l'eau stagnante qu'ils contiennent et que, même en l'absence de liquide, leurs

œufs résistent à la déshydratation pendant des semaines, voire des mois (19,20). De plus, les passagers des lignes aériennes transmettent les infections dans de nouvelles régions. Ainsi, au Canada, les passagers de retour au pays ont transmis le virus Zika et provoqué une éclosion du coronavirus du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) (15,21,22).

Les risques accrus de maladies infectieuses causées par les changements climatiques posent ainsi des risques importants pour la santé publique, et des efforts sont en cours pour surveiller, évaluer et prédire leurs répercussions. Auparavant, la gestion de la santé publique reposait sur des systèmes de déclaration et de surveillance des maladies à déclaration obligatoire, qui visaient à détecter les éclosions, à suivre la progression des maladies et à éclairer les politiques de prévention et de contrôle. Malheureusement, les systèmes traditionnels de surveillance se caractérisent par des retards dans la transmission et l'analyse des données, et dans la communication des résultats.

Compte tenu de la nécessité d'avoir un système de surveillance des problèmes émergents qui soit plus en temps réel et de comprendre plus tôt leurs répercussions possibles sur la santé, on a élaboré et l'on continue d'élaborer deux stratégies d'évaluation des risques : les systèmes de surveillance événementielle qui, de plus en plus, font appel à l'intelligence artificielle et la modélisation des risques. Le présent aperçu a pour objectif de décrire ces deux stratégies et d'expliquer en quoi elles peuvent éclairer les mesures de santé publique prises afin de prévenir, de détecter et de contrôler les augmentations de cas de maladies infectieuses causées par les changements climatiques.

Systèmes de surveillance événementielle

Les systèmes de surveillance événementielle font appel à plusieurs données à code source libre et à plusieurs techniques d'évaluation permettant de reconnaître les menaces pour la santé (23,24). On compte, parmi ces données à code source libre, les fils de presse en ligne, les réseaux sociaux et les autres flux de données Internet, en de nombreuses langues, qui permettent de détecter de façon précoce les menaces pour la santé publique. On a démontré que ces systèmes sont plus rapides que les données de surveillance traditionnelles transmises par les laboratoires ou les hôpitaux (25) et qu'ils peuvent servir, en association avec les systèmes traditionnels de surveillance, à faciliter la communication précoce de menaces pour la santé publique (26). Plus on reconnaît les signes d'une éclosion en pleine évolution rapidement, plus on peut, sans tarder, en assurer le suivi, ainsi que planifier et mettre en œuvre les mesures d'intervention nécessaires afin de protéger la santé publique (27).



Il existe trois types de systèmes de surveillance événementielle : modéré, partiellement modéré et entièrement automatisé (28). Le niveau d'automatisation influe sur la gestion du flux de l'information dans les systèmes à partir des données à code source libre provenant des agrégateurs (Factiva, Google News, Moreover Baidu, etc.), du format RSS et des réseaux sociaux, qu'ils soient de sources officielles ou officieuses (Twitter pour les Centers for Disease Control américains et le grand public, etc.), et à partir des rapports officiels validés (Organisation mondiale de la Santé, Centers for Disease Control américains, etc.). Programme de suivi des maladies émergentes, ProMED constitue un exemple de système modéré. Il était au cœur de l'élaboration de systèmes de surveillance événementielle il y a plus de 25 ans (29,30). ProMED est exécuté par des analystes bénévoles (qui constituent en quelque sorte des conservateurs experts des données) qui cherchent et choisissent des articles de presse, en valident le contenu et avertissent les abonnés en cas d'éclosion importante de maladies infectieuses. Les avantages de ce programme sont son faible rapport signal sur bruit, son accès ouvert et sa grande portée. Par contre, ces bénévoles ne couvrent pas toutes les populations à risque, leurs partis pris peuvent influencer sur la modération des cas et, ce qui est normal, ils ne disposent pas de ressources suffisantes pour fournir des renseignements détaillés permettant de connaître la situation et ainsi d'évaluer avec précision le niveau de danger (29).

Le Réseau mondial d'intelligence en santé publique (RMISP) est un système partiellement modéré créé par le gouvernement du Canada, en collaboration avec l'Organisation mondiale de la Santé, quatre ans après ProMED (31–33). Son accès est réservé aux organismes ayant un mandat lié à la santé. Les algorithmes d'intelligence artificielle du RMISP automatisent un flux de 2000 à 3000 articles de presse par jour, modérés par 12 analystes experts qui reconnaissent les menaces et lancent une alerte au besoin, à la lumière de données contextuelles tacites (contexte historique, tendances du marché, interdictions de voyager, anomalies climatiques, etc.). L'exemple suivant permet de voir à quel point ce réseau peut être utile : au début de 2003, les analystes ont pu lire des rapports chinois mentionnant la hausse des ventes de traitements antiviraux immédiatement avant le déclenchement de l'épidémie mondiale de SRAS (34). Contrairement à ProMED, le RMISP est filtré à plusieurs étapes au moyen de l'intelligence artificielle et d'analystes qualifiés. L'intelligence artificielle permet de traiter un flux de données plus important, tandis que les analystes disposent des ressources nécessaires pour faire connaître la situation. Bien que ProMED et le RMISP puissent tous deux analyser plusieurs langues, il est coûteux de le faire dans le cas du RMISP, car il faut engager des analystes parlant couramment des langues étrangères (33).

Parmi les systèmes entièrement automatisés, on compte le système d'information médicale de la Commission européenne (MedISys), le Pattern-based Understanding and Learning System (PULS) et HealthMap. Bien que ces systèmes soient accessibles au public, ils comportent aussi des zones réservées aux organismes sanitaires : forums de discussion privés,

fonctionnalité accrue et traitement des données de sources commerciales (35,36). Les systèmes entièrement automatisés traitent les données plus rapidement et leur utilisation est moins coûteuse que les systèmes modérés. Leur principal désavantage est leur rapport signal sur bruit plus élevé, qui se traduit par un risque accru de détecter de fausses menaces (37,38). On peut toutefois relier les systèmes de surveillance événementielle et les faire fonctionner en synergie pour atténuer ce risque (39). Par exemple, MedISys recueille les données, au faible rapport signal sur bruit, de ProMED et du RMISP, et il fait appel aux algorithmes du PULS, qui traitent mieux les langues. Le PULS extrait l'information sur les cas repérés par MedISys, puis il la renvoie à MedISys (36,40). Le **tableau 1** résume les types de systèmes de surveillance événementielle.

Applications de l'intelligence artificielle

Les applications de l'intelligence artificielle au traitement des données ont révolutionné la capacité des systèmes de surveillance événementielle à détecter rapidement et sans faute les menaces telles que les éclosions de maladies infectieuses. Les données Internet à code source libre sont considérées comme des données non structurées, en ce sens que les articles de presse, les blogues, les gazouillis, etc., racontent et décrivent des faits. Comme le texte, les chiffres et les dates ne suivent pas les modèles de données (p.ex. une base de données) pouvant servir à la détection automatisée des cas et à la modélisation des risques, il faut traiter les données à code source libre en vue d'extraire et de structurer l'information sur la nature du cas, le lieu et la date où il s'est produit, et les personnes touchées. Les systèmes de surveillance événementielle recourent à des méthodes de traitement des langues naturelles pour traiter et comprendre les cas (46–48). Le traitement des langues naturelles est un domaine des sciences qui se consacre à la compréhension du discours humain (49). L'analyse du sous-langage est l'une des premières méthodes. On se sert des règles et des modèles pour interpréter et classer le vocabulaire, la syntaxe et la sémantique d'un texte descriptif non structuré. Les systèmes de surveillance événementielle ont des taxonomies associant des termes prédéfinis et leurs synonymes aux termes trouvés dans les sources de données. Tout comme la recherche documentaire traditionnelle, la classification taxinomique de textes descriptifs peut repérer des articles sur la santé en cherchant des termes connexes. Par exemple, les synonymes de la grippe A sont H1N1, grippe H1N1, grippe de type A, influenza A, influenza de type A, grippe porcine, grippe du porc et grippe de Hong Kong (50). Si la méthode du sous-langage de détection des données sur la santé dans les systèmes de surveillance événementielle est efficace, elle comporte aussi des inconvénients. Les taxonomies ne sont pas faciles à généraliser. Il faut en créer une pour chaque maladie dont on assure le suivi et aussi la mettre à jour puisque la langue évolue et que les scientifiques font sans cesse de nouvelles découvertes sur les maladies. C'est pourquoi le traitement des langues naturelles a posé une assise solide en matière de recours aux méthodes d'apprentissage automatique.


Tableau 1 : Résumé de certains systèmes de surveillance événementielle

Type	Exemple	Année de création	Accessibilité au public
Système modéré ^a	Program for Monitoring Emerging Disease (ProMED) (29,30)	En 1994 à titre d'organisme sans but lucratif	Oui
Système partiellement modéré ^b	Réseau mondial de renseignement de santé publique (RMISP) (31–33)	En 1998 grâce à la collaboration du gouvernement du Canada et de l'Organisation mondiale de la Santé	Non; réservé aux organismes sanitaires membres du Réseau
Système entièrement automatisé ^c	Medical Information System (MedISys) (36,41,42)	En 2004 par la Commission européenne	Oui
	HealthMap (35,38,40,43)	En 2006 par le Boston Children's Hospital	Oui
	Pattern-based Understanding and Learning System (PULS) (36,44,45)	En 2007 par le Département d'informatique de l'Université d'Helsinki, en Finlande	Oui

^a Dans un système modéré, des « conservateurs » experts bénévoles reconnaissent, examinent et valident les sources, et produisent les rapports

^b Le système partiellement modéré acquiert, classe et filtre les sources automatiquement. Ses conservateurs experts modèrent le sous-ensemble des sources et produisent les rapports

^c Le système entièrement automatisé acquiert, classe et filtre les sources automatiquement, et produit aussi les rapports automatiquement

L'apprentissage automatique est un sous-ensemble de l'intelligence artificielle qui fait appel à des algorithmes, comme des modèles statistiques, pour exécuter une tâche donnée sans instructions explicites et en recourant plutôt à des modèles et à l'inférence. Les systèmes de surveillance événementielle recueillent des données Internet à code source libre (les flux et les requêtes), puis les filtrent par une combinaison d'analyse du sous-langage et d'apprentissage automatique, ce dernier servant aux tâches plus complexes, soit l'analyse de la syntaxe, de la sémantique, de la morphologie, de la pragmatique et du discours (51). L'apprentissage automatique peut ainsi servir à déterminer la différence entre les articles ne portant pas sur la santé (p.ex. la « fièvre Justin Bieber » fait référence aux fans du chanteur) et les articles portant sur l'écllosion d'une maladie infectieuse (43,51,52). L'apprentissage automatique peut également servir à éclaircir les ambiguïtés dans les dates et les lieux, comme les écllosions passées et les écllosions en cours, dans les articles discutant du contexte historique (53,54). De plus, on élabore des applications avant-gardistes de l'apprentissage automatique, telles que la structuration des données sur les cas sous forme de listes de parcours des éléments épidémiologiques (la liste des patients infectés et l'information connexe : état de santé, sexe, lieu, date d'apparition de la maladie, hospitalisation, etc.) pouvant servir à enquêter sur les écllosions et à réaliser une modélisation des risques (55). Après avoir traité les données Internet à code source libre et créé un modèle, on peut, le cas échéant, examiner l'événement et produire un rapport à son sujet. Qui plus est, on peut analyser des données supplémentaires afin de communiquer l'incidence, actuelle et prévue, de la menace pour la santé. Le **tableau 2** constitue le résumé du flux d'information provenant de la collecte de données par les systèmes de surveillance événementielle, de leur traitement, de leur analyse et de la production de rapports.

Modélisation des risques

La plus grande variété des données de modélisation constitue un progrès important dans l'évaluation des risques. Dans le contexte des maladies infectieuses, la modélisation des risques est le processus par lequel on reconnaît et l'on caractérise,

chez les individus ou les populations, les facteurs accroissant leur vulnérabilité à contracter une maladie (leur âge, leur proximité du lieu de l'écllosion, etc.). L'induction statistique est une méthode solide et instructive de modélisation des risques, qui comprend l'analyse de régression. Elle sert à établir le lien entre les facteurs de risque (variables explicatives) et le résultat (p.ex. le nombre de cas signalés). Les modèles de régression, et l'induction statistique en général, s'élargissent et comprennent désormais l'information tirée de données Internet à code source libre. En voici un exemple remontant aux tout débuts : on recourait aux données recueillies par le moteur de recherche de Google Flu Trends pour prédire le résultat du nombre de consultations de médecins pour des maladies d'allure grippale (56). On se servait ensuite du modèle résultant pour prédire le nombre de cas de grippe saisonnière une ou deux semaines à l'avance. Malheureusement, cette approche prédisait mal les écllosions survenant à des moments autres que pendant la saison de la grippe, en raison des associations de mots recherchées par le moteur de recherche qui n'avaient rien à voir avec la grippe saisonnière (p.ex. la saison hivernale du basketball) (57). On a ensuite amélioré l'exactitude du système pour ce qui est de la prédiction des tendances de grippe saisonnière en recourant à des sources supplémentaires de données à code source libre (p.ex. Twitter) et en élargissant la méthode de régression de façon à ce qu'elle profite des algorithmes d'apprentissage automatique qui peuvent trouver des associations complexes entre le résultat et les variables explicatives (58). Qui plus est, on a amélioré la modélisation de la régression pour les risques d'infection en y ajoutant, en plus des données Internet à code source libre, d'autres variables explicatives (p.ex. les données climatiques et météorologiques transmises par les satellites) sur la présence, sur les déplacements et sur la distribution des pathogènes, des vecteurs, des espèces réservoirs et des personnes infectées (59,60). Par exemple, en Chine, on a amélioré les prédictions sur le nombre de cas de syndrome pieds-mains-bouche chez les enfants en incluant les données hebdomadaires sur la température et sur les précipitations, ainsi que les données sur les requêtes sur le syndrome pieds-mains-bouche faites au moyen de Baidu, le moteur de recherche chinois (61).



Autre approche fréquente de modélisation des risques, les modèles compartimentaux simulent de façon mathématique la dynamique de transmission au sein d'une population – autrement dit, le flux des états de santé chez les individus qu'on classe en patients sains (S), infectés (I) et guéris (R). Par exemple, les modèles SIR requièrent qu'on définisse les paramètres pour le taux de patients infectés (ou, au contraire, la période d'infection) et le taux de contacts infectés. Il est alors possible d'estimer si l'infection d'une population se transformera en épidémie et de caractériser la prévalence de la maladie au fil du temps. L'approche des modèles compartimentaux s'est récemment élargie pour inclure la simulation de la dynamique de transmission au sein de plusieurs populations (métapopulations). Il faut y ajouter les données sur la mobilité afin de définir le taux des personnes se déplaçant d'une population à l'autre (62). Sur le plan de la métapopulation, on peut considérer la mobilité humaine comme le déplacement des gens dans un réseau interrelié de villes et de pays. On peut tirer ces données des relevés des appels faits par des téléphones cellulaires et des volumes de passagers se déplaçant en avion (63,64). Grâce à la modélisation de la métapopulation, on peut savoir par quels chemins les pathogènes se propageront au Canada et en calculer la probabilité (65,66). Par exemple, le virus Zika serait apparu pour la première fois au Brésil entre août 2013 et avril 2014. Des voyageurs infectés seraient arrivés à Rio de Janeiro, à Brasilia, à Fortaleza ou à Salvador, et leur arrivée a été suivie d'épidémies à Haïti, au Honduras, au Vénézuéla, puis en Colombie (21).

Discussion

On ne sait trop si les changements climatiques influenceront sur les nombreux facteurs liés à l'occurrence et à la diffusion des maladies infectieuses. Ces facteurs comprendront sans aucun

doute les fluctuations de l'aire de distribution des vecteurs et des espèces réservoirs, la mobilité des gens et des biens, ainsi que l'arrivée possible de pathogènes qui en découle, ce qui entraînera des répercussions sur l'exposition et les risques de transmission. Afin d'assurer le suivi des éclosions de maladies infectieuses de façon rapide et efficace, les professionnels de la santé publique ont besoin d'un meilleur accès à des données de surveillance à jour. Pour ce faire, on complète de plus en plus par des systèmes de surveillance événementielle les données traditionnelles, par exemple celles tirées des systèmes de surveillance des maladies à déclaration obligatoire. Même si les systèmes de surveillance événementielle profitent de l'apprentissage automatique et du traitement des langues naturelles qui optimisent l'exploitation des données, il reste néanmoins des obstacles à surmonter (59). Ainsi, il existe encore des problèmes de partage et de confidentialité des données à résoudre. Par exemple, à quel niveau peut-on utiliser et divulguer des données personnelles dans la détection de cas de maladie? Google et Twitter fournissent librement au public des données finement agrégées par semaine et par ville. Cela dit, des renseignements plus précis sur la date et le lieu de la source assureraient une détection plus détaillée (26). Qui plus est, les habitants de cette planète utilisent Internet et les réseaux sociaux chacun à leur façon et à des moments différents. En effet, on a constaté des écarts dans l'usage d'Internet et du téléphone cellulaire en Afrique (67); en Chine, c'est Baidu et non Google, qui est le principal moteur de recherche (61); et la tendance des gens à se servir de Twitter pour déclarer des maladies dépend de leur âge et de leur statut socio-économique (68).

La modélisation des risques permet d'estimer l'incidence des maladies infectieuses émergentes sur la santé. Les progrès accomplis dans cette modélisation sont, entre autres, les

Tableau 2 : Flux d'information des données Internet à code source libre dans les systèmes de surveillance événementielle

Systèmes de surveillance événementielle	Collecte de données	Traitement	Analyse	Production de rapports
Systèmes modérés	Des analystes humains repèrent les données Internet à code source libre portant sur la santé	Des analystes humains examinent le cas, procèdent au filtrage et établissent son niveau de danger	Aucun	On envoie par courriel des rapports sur les menaces pour la santé et on les affiche sur le site Web du système de surveillance événementielle
Systèmes partiellement modérés ou entièrement automatisés	Source automatique de données Internet à code source libre	La classification taxonomique et les algorithmes d'apprentissage automatique filtrent et classent les cas selon leurs métadonnées (p.ex. le type de menace, le lieu et la date). Les algorithmes d'apprentissage automatiques évaluent leur niveau de pertinence. Dans les systèmes partiellement modérés, ce sont des analystes humains qui organisent les sources de données présentant un score élevé	Les techniques analytiques évoluent au fil du temps et diffèrent d'un système de surveillance événementielle à l'autre. On compte, parmi les techniques courantes, le géomarquage des cas; les diagrammes à barres montrant les fluctuations du nombre de mots-clés au fil du temps, du nombre d'articles détectés et du nombre (attendu et observé) de cas de la maladie en question; les nuages de mots-clés illustrant l'importance des termes-clés; les alertes en cas de hausse soudaine du nombre de cas, de la fiabilité des sources ou du nombre de sources uniques	On envoie par courriel des rapports sur les menaces pour la santé, on les affiche sur le site Web du système de surveillance événementielle et l'on avise les communautés pertinentes d'utilisateurs d'applications Web



suivants : l'intégration des données climatiques et des données Internet à code source libre qui éclairent ces estimations, et le calcul de la mobilité des êtres humains, qui propagent les maladies infectieuses aux quatre coins du globe. À l'instar des systèmes de surveillance événementielle, les approches de modélisation des risques sont limitées par la disponibilité des données obtenues. Par exemple, les relevés des appels faits avec des téléphones cellulaires et les données liées au trafic aérien fournissent respectivement des renseignements à la tour de téléphonie cellulaire la plus proche et à l'aéroport le plus proche, mais des données plus précises sur l'emplacement des patients sont fournies, sous réserve des questions de confidentialité, par le système de localisation GPS des téléphones mobiles. Les données sur chaque individu pourraient améliorer énormément notre compréhension des facteurs liés à l'occurrence des maladies et à la diffusion des pathogènes, par exemple le rôle joué par certains patients dans l'écllosion de SRAS en 2003 (69).

Conclusion

Les progrès accomplis dans l'évaluation des changements associés aux vecteurs, aux espèces réservoirs et à l'activité humaine, de même que leurs répercussions sur les maladies infectieuses, sont suivis par plusieurs stratégies de surveillance et d'analyse. Les systèmes de surveillance événementielle ont recours à des données à code source libre pour recueillir de l'information sur les maladies infectieuses. Ces systèmes sont soit modérés, soit partiellement modérés, soit entièrement automatisés, chaque type comportant des avantages et des désavantages. On observe une tendance à l'automatisation, car elle permet de traiter des volumes importants de données. De plus, l'apprentissage automatique et le traitement des langues naturelles deviennent de plus en plus précis au point qu'un jour, leurs capacités dépasseront peut-être celles des modérateurs humains. On se sert souvent de la modélisation des risques pour comprendre et prédire les répercussions des maladies infectieuses sur la santé à l'aide de l'induction statistique et des modèles compartimentaux. Ces méthodes améliorent les capacités de détecter les populations vulnérables aux maladies émergentes et de prédire par quelles voies elles arriveront au

pays et quelle sera leur incidence sur la santé, en intégrant les données Internet à code source libre et les données sur la mobilité humaine aux données plus traditionnelles sur le climat et les éclosions de maladies infectieuses. Les méthodes que nous avons présentées ici sont des développements prometteurs qui nous aideront à affronter les menaces changeantes posées par des maladies dont l'évolution est influencée par les changements climatiques. En ayant en main plus rapidement une plus grande quantité de données plus précises, les professionnels de la santé publique pourront confirmer et évaluer en moins de temps les éventuelles éclosions de maladies infectieuses et, de ce fait, en élaborer et en entreprendre le traitement (et concevoir et déployer d'autres stratégies de contrôle) de manière plus rapide.

Déclaration des auteurs

EER — Conceptualisation, Enquête, Rédaction — ébauche originale, supervision et administration du projet
VN — Enquête, Rédaction — examen et révision
PG — Rédaction — examen et révision
AM — Rédaction — examen et révision
DM — Rédaction — examen et révision
JP — Rédaction — examen et révision
DY — Rédaction — examen et révision
JP — Rédaction — examen et révision
JK — Enquête, Rédaction — examen et révision

Conflit d'intérêts

Aucun.

Financement

Le présent travail a été soutenu par l'Agence de la santé publique du Canada.



Références

1. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Centers for Environmental Information. Climate at a Glance: Global Mapping. NOAA; 2018 (Accessed 2018-11-14). www.ncdc.noaa.gov/cag/
2. O'Neill BC, Oppenheimer M, Warren R, Hallegatte S, Kopp RE, Pörtner HO, Scholes R, K, van Ypersele JP, Yohe G. IPCC reasons for concern regarding climate change risks. *Nature Climate Change* 2017;7:28–37. DOI
3. Environnement et Changement climatique Canada. Données et scénarios climatiques : Synthèse des observations et des résultats récents de modélisation. Gatineau(QC) : 2016. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/publications/donnees-scenarios-synthese-observations-recents.html>
4. Blunden J, Anrdt DS, Hartfield G, editors. State of the Climate in 2017. *Bull Am Meteor Soc* 2018;99(8):Si-S332. DOI
5. Myers P, Lundrigan BL, Hoffman SM, Haraminac AP, Seto SH. Climate-induced changes in the small mammal communities of the Northern Great Lakes Region. *Glob Change Biol* 2009;15(6):1434–54. DOI
6. Roy-Dufresne E, Logan T, Simon JA, Chmura GL, Millien V. Poleward expansion of the white-footed mouse (*Peromyscus leucopus*) under climate change: implications for the spread of lyme disease. *PLoS One* 2013 Nov;8(11):e80724. DOI PubMed
7. Gasmi S, Ogden NH, Lindsay LR, Burns S, Fleming S, Badcock J, Hanan S, Gaulin C, Leblanc MA, Russell C, Nelder M, Hobbs L, Graham-Derham S, Lachance L, Scott AN, Galanis E, Koffi JK. Maladie de Lyme au Canada, de 2009 à 2015. Relevé des maladies transmissibles au Canada. 2017;43(10):219-25. DOI
8. McPherson M, García-García A, Cuesta-Valero FJ, Beltrami H, Hansen-Ketchum P, MacDougall D, Ogden NH. Expansion of the Lyme disease vector *Ixodes Scapularis* in Canada inferred from CMIP5 climate projections. *Environ Health Perspect* 2017 May;125(5):057008. DOI PubMed
9. Ogden NH, Mechai S, Margos G. Changing geographic ranges of ticks and tick-borne pathogens: drivers, mechanisms and consequences for pathogen diversity. *Front Cell Infect Microbiol* 2013 Aug;3:46. DOI PubMed
10. Lafferty KD. The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology* 2009 Apr;90(4):888–900. DOI PubMed
11. Berchin II. Climate change and forced migrations: an effort towards recognizing climate refugees. *Geoforum* 2017;84:147–50. DOI
12. McMichael C. Climate change-related migration and infectious disease. *Virulence* 2015;6(6):548–53. DOI PubMed
13. Scott D, McBoyle G. Using a 'tourism climate index' to examine the implications of climate change for climate as a tourism resource. In: Matzarakis A, de Freitas CR, editors. *Proceedings of First International Workshop on Climate Tourism and Recreation*. 2001 Oct 5- Oct 10; Porto Carras, Greece. International Society of Biometeorology; 2001, p. 69–88. www.academia.edu/2876399/Using_a_tourism_climate_index_to_examine_the_implications_of_climate_change_for_climate_as_a_tourism_resource
14. Scott D, McBoyle G, Schwartzentruber M. Climate change and the distribution of climatic resources for tourism in North America. *Clim Res* 2004;27(2):105–17. DOI
15. Ogden NH, Fazil A, Safronetz D, Drebot MA, Wallace J, Rees EE, Decock K, Ng V. Risk of travel-related cases of Zika virus infection is predicted by transmission intensity in outbreak-affected countries. *Parasit Vectors* 2017 Jan;10(1):41–9. DOI PubMed
16. Lounibos LP. Invasions by insect vectors of human disease. *Annu Rev Entomol* 2002;47(1):233–66. DOI PubMed
17. Tatem AJ, Rogers DJ, Hay SI. Global transport networks and infectious disease spread. *Adv Parasitol* 2006;62:293–343. DOI PubMed
18. Tuite AR, Thomas-Bachli A, Acosta H, Bhatia D, Huber C, Petrasko K, Watts A, Yong JHE, Bogoch II, Khan K. Infectious disease implications of large-scale migration of Venezuelan nationals. *J Travel Med*. 2018;25(1). DOI
19. Manguin S, Boete C. The Importance of Biological Interactions in the Study of Biodiversity. Rijeka, Croatia: InTech; 2011. Chapter 3, Global Impact of Mosquito Biodiversity, Human Vector-Borne Diseases and Environmental Change; p. 27–50. DOI
20. Egizi A, Kiser J, Abadam C, Fonseca DM. The hitchhiker's guide to becoming invasive: exotic mosquitoes spread across a US state by human transport not autonomous flight. *Mol Ecol* 2016 Jul;25(13):3033–47. DOI PubMed
21. Zhang Q, Sun K, Chinazzi M, Pastore Y Piontti A, Dean NE, Rojas DP, Merler S, Mistry D, Poletti P, Rossi L, Bray M, Halloran ME, Longini IM Jr, Vespignani A. Spread of Zika virus in the Americas. *Proc Natl Acad Sci USA* 2017 May;114(22):E4334–43. DOI PubMed
22. Ruan S, Wang W, Levin SA. The effect of global travel on the spread of sars. *Math Biosci Eng* 2006 Jan;3(1):205–18. DOI PubMed
23. Barboza P, Vaillant L, Le Strat Y, Hartley DM, Nelson NP, Mawudeku A, Madoff LC, Linge JP, Collier N, Brownstein JS, Astagneau P. Factors influencing performance of internet-based biosurveillance systems used in epidemic intelligence for early detection of infectious diseases outbreaks. *PLoS One* 2014 Mar;9(3):e90536. DOI PubMed
24. Hartley D, Nelson N, Walters R, Arthur R, Yangarber R, Madoff L, Linge J, Mawudeku A, Collier N, Brownstein J, Thinus G, Lightfoot N. Landscape of international event-based biosurveillance. *Emerg Health Threats J* 2010;3(1):7096. DOI PubMed
25. Keller M, Blench M, Tolentino H, Freifeld CC, Mandl KD, Mawudeku A, Eysenbach G, Brownstein JS. Use of unstructured event-based reports for global infectious disease surveillance. *Emerg Infect Dis* 2009 May;15(5):689–95. DOI PubMed



26. Lazer D, Kennedy R, King G, Vespignani A. Big data. The parable of Google Flu: traps in big data analysis. *Science* 2014 Mar;343(6176):1203–5. [DOI PubMed](#)
27. Heymann DL. SARS and emerging infectious diseases: a challenge to place global solidarity above national sovereignty. *Ann Acad Med Singapore* 2006 May;35(5):350–3. [PubMed](#)
28. Linge JP, Steinberger R, Weber TP, Yangarber R, van der Goot E, Al Khudhairi DH, Stilianakis NI. Internet surveillance systems for early alerting of health threats. *Euro Surveill* 2009 Apr;14(13):19162. [PubMed](#)
29. Carrion M, Madoff LC. ProMED-mail: 22 years of digital surveillance of emerging infectious diseases. *Int Health* 2017 May;9(3):177–83. [DOI PubMed](#)
30. Yu VL, Madoff LC. ProMED-mail: an early warning system for emerging diseases. *Clin Infect Dis* 2004 Jul;39(2):227–32. [DOI PubMed](#)
31. Mykhalovskiy E, Weir L. The Global Public Health Intelligence Network and early warning outbreak detection: a Canadian contribution to global public health. *Can J Public Health* 2006 Jan-Feb;97(1):42–4. [PubMed](#)
32. Mawudeku A, Blench M, Boily L, St. John R, Andraghetti R, Ruben M. *Infectious Disease Surveillance*. 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons; 2013. Chapter 31, The Global Public Health Intelligence Network; p. 457–69. www.wiley.com/en-us/Infectious+Disease+Surveillance%2C+2nd+Edition-p-9780470654675
33. Dion M, AbdelMalik P, Mawudeku A. Les données massives et le Réseau mondial d'information en santé publique (RMISP). *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2015;41(9):209–14. [DOI](#)
34. Knobler S, Mahmoud A, Lemon S, Sivitz L, Oberholtzer K, editors. *Learning from SARS: Preparing for the Next Disease Outbreak: Workshop Summary* (Institute of Medicine). Washington, DC: The National Academies Press; 2004. p. 376. www.nap.edu/catalog/10915/learning-from-sars-preparing-for-the-next-disease-outbreak-workshop
35. Harris JK, Hinyard L, Beatty K, Hawkins JB, Nsoesie EO, Mansour R, Brownstein JS; Louis Department of Health. Evaluating the implementation of a twitter-based foodborne illness reporting tool in the city of St. Int *J Environ Res Public Health* 2018 Apr;15(5):833. [DOI PubMed](#)
36. Linge JP, Steinberger R, Fuat F, Bucci S, Belyaeva J, Gemo M, Al-Khudhairi D, Yangarber R, van der Goot E. *Advanced ICTs for Disaster Management and Threat Detection: Collaborative and Distributed Frameworks*. Hershey, PA: IGI Publishing; 2011. Chapter: 9, MedISys: Medical Information System; p.131-142. [DOI](#)
37. Mantero J, Belyaeva J, Linge JP. How to maximise event-based surveillance web- systems : the example of ECDC/JRC collaboration to improve the performance of MedISys. Luxembourg; European Commission Joint Research Centre; 2011. Report No.: JRC 63805. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/11111111/16206/1/lb-na-24763-en-c.pdf>
38. Brownstein JS, Freifeld CC, Reis BY, Mandl KD. Surveillance Sans Frontières: internet-based emerging infectious disease intelligence and the HealthMap project. *PLoS Med* 2008 Jul;5(7):e151. [DOI PubMed](#)
39. Barboza P, Vaillant L, Mawudeku A, Nelson NP, Hartley DM, Madoff LC, Linge JP, Collier N, Brownstein JS, Yangarber R, Astagneau P; Early Alerting Reporting Project Of The Global Health Security Initiative. Evaluation of epidemic intelligence systems integrated in the early alerting and reporting project for the detection of A/H5N1 influenza events. *PLoS One* 2013;8(3):e57252. [DOI PubMed](#)
40. Freifeld CC, Mandl KD, Reis BY, Brownstein JS. HealthMap: global infectious disease monitoring through automated classification and visualization of Internet media reports. *J Am Med Inform Assoc* 2008 Mar-Apr;15(2):150–7. [DOI PubMed](#)
41. Rortais A, Belyaeva J, Gemo M, van der Goot E, Linge JP. MedISys: an early-warning system for the detection of (re-) emerging food- and feed-borne hazards. *Food Res Int* 2010;43(5):1553–6. [DOI](#)
42. Alomar O, Batlle A, Brunetti JM, García R, Gil R, Granollers A, Jimenez S, Lavina A. Llinge JP, Pautasso M, Reverte C, Riudavets J, Rortais A, Sancanelli G, Volani S, Vos S. Development and testing of the media monitoring tool MedISys for early identification and reporting of existing and emerging plant health threats. *Bull OEPP* 2015;45(2):288–93. [DOI](#)
43. Hawkins JB, Tuli G, Kluberg S, Harris J, Brownstein JS, Nsoesie E. A Digital Platform for Local Foodborne Illness and Outbreak Surveillance. *Online J Public Health Inform* 2016;8(1):e60. [DOI](#)
44. Hartley DM, Nelson NP, Arthur RR, Barboza P, Collier N, Lightfoot N, Linge JP, van der Goot E, Mawudeku A, Madoff LC, Vaillant L, Walters R, Yangarber R, Mantero J, Corley CD, Brownstein JS. An overview of internet biosurveillance. *Clin Microbiol Infect* 2013 Nov;19(11):1006–13. [DOI PubMed](#)
45. Yangarber R, Jokipii L, Rauramo A, Huttunen S. Extracting information about outbreaks of infectious epidemics. In: *Proceedings of the Conference on Human Language Technology and Empirical Methods in Natural Language Processing*; 2005 Oct 6 - Oct 8; Vancouver, Canada. Stroudsburg, PA: Association for Computational Linguistics; 2005. p. 22–3. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1220575&picked=prox>
46. Zeng Z, Shi H, Wu Y, Hong Z. Survey of Natural Language Processing Techniques in Bioinformatics. *Comput Math Methods Med* 2015;2015:674296. [DOI PubMed](#)
47. Iroju OG, Olaleke JO. Information Technology and Computer Science. *Inf Technol Comput Sci*. 2015;08:44–50. www.mecspress.org/DOI:10.5815/ijitcs.2015.08.07
48. Jordan S, Hovet S, Fung I, Liang H, Fu KW, Tsz Ho Tse Z. Using Twitter for Public Health Surveillance from Monitoring and Prediction to Public Response. *Data (Basel)* 2018;4(1):6. [DOI](#)
49. Liu F, Weng C, Yu H. *Clinical Research Informatics, Health Informatics*. pringer International Publishing; 2019. Chapter 17, Advancing Clinical Research Through Natural Language Processing on Electronic Health Records: Traditional Machine Learning Meets Deep Learning; p. 357–78. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-98779-8>



50. Coppersmith G, Dredze M, Harman C. Quantifying Mental Health Signals in Twitter. In: Proceedings of the Workshop on Computational Linguistics and Clinical Psychology: From linguistic signal to clinical reality; June 2014; Baltimore, MD: Association for Computational Linguistics; 2014. p. 51-60. DOI
51. Şerban O, Thapen N, Maginnis B, Hankin C, Foot V. Real-time processing of social media with SENTINEL: A syndromic surveillance system incorporating deep learning for health classification. *Inf Process Manage* 2019;56(3):1166–84. DOI
52. Sarker A, Gonzalez G. Portable automatic text classification for adverse drug reaction detection via multi-corpus training. *J Biomed Inform* 2015 Feb;53:196–207. DOI PubMed
53. Sprugnoli R, Caselli T, Tonelli S, Moretti G. The Content Types Dataset: a New Resource to Explore Semantic and Functional Characteristics of Texts. In: Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics; 2017 July 30 - Aug 4; Vancouver Canada. ACL; 2017. p. 260–6. <http://acl2017.org/>
54. Gritta M, Pilehvar MT, Collier N. A Pragmatic Guide to Geoparsing Evaluation: Toponyms, Named Entity Recognition and Pragmatics. 2018. Language Technology Lab, Department of Teoretical and Applied Linguistics, University of Cambridge, Cambridge UK. www.academia.edu/38110706/A_Pragmatic_Guide_to_Geoparsing_Evaluation
55. Ghosh S, Chakraborty P, Lewis BL, Majumder M, Cohn E, Brownstein JS, Marathe M, Ramakrishnan N. GELL: Automatic extraction of epidemiological line lists from open sources. In: Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining; 2017 Aug 13- Aug 17; Halifax, Canada. New York USA: Association for Computing Machinery; 2017. p. 1477–86. DOI
56. Ginsberg J, Mohebbi MH, Patel RS, Brammer L, Smolinski MS, Brilliant L. Detecting influenza epidemics using search engine query data. *Nature* 2009 Feb;457(7232):1012–4. DOI PubMed
57. Santillana M, Zhang DW, Althouse BM, Ayers JW. What can digital disease detection learn from (an external revision to) Google Flu Trends? *Am J Prev Med* 2014 Sep;47(3):341–7. DOI PubMed
58. Santillana M, Nguyen AT, Dredze M, Paul MJ, Nsoesie EO, Brownstein JS. Combining Search, Social Media, and Traditional Data Sources to Improve Influenza Surveillance. *PLOS Comput Biol* 2015 Oct;11(10):e1004513. DOI PubMed
59. Pollett S, Althouse BM, Forshey B, Rutherford GW, Jarman RG. Internet-based biosurveillance methods for vector-borne diseases: are they novel public health tools or just novelties? *PLoS Negl Trop Dis* 2017 Nov;11(11):e0005871. DOI PubMed
60. Gluskin RT, Johansson MA, Santillana M, Brownstein JS. Evaluation of Internet-based dengue query data: Google Dengue Trends. *PLoS Negl Trop Dis* 2014 Feb;8(2):e2713. DOI PubMed
61. Huang DC, Wang JF. Monitoring hand, foot and mouth disease by combining search engine query data and meteorological factors. *Sci Total Environ* 2018 Jan;612:1293–9. DOI PubMed
62. Ajelli M, Gonçalves B, Balcan D, Colizza V, Hu H, Ramasco JJ, Merler S, Vespignani A. Comparing large-scale computational approaches to epidemic modeling: agent-based versus structured metapopulation models. *BMC Infect Dis* 2010 Jun;10:190. DOI PubMed
63. Wesolowski A, Buckee CO, Engø-Monsen K, Metcalf CJ. Connecting mobility to infectious diseases: the promise and limits of mobile phone data. *J Infect Dis* 2016 Dec;214 suppl_4:S414–20. DOI PubMed
64. Balcan D, Colizza V, Gonçalves B, Hu H, Ramasco JJ, Vespignani A. Multiscale mobility networks and the spatial spreading of infectious diseases. *Proc Natl Acad Sci USA* 2009 Dec;106(51):21484–9. DOI PubMed
65. Arino J, Khan K. Analyzing and Modelling Spatial and Temporal Dynamics of Infectious Disease. Hoboken NJ: John Wiley & Sons; 2014. Chapter 5, Using Mathematical Modeling to Integrate Disease Surveillance and Global Air Transportation Data; p. 1–14.
66. Brockmann D, Helbing D. The hidden geometry of complex, network-driven contagion phenomena. *Science* 2013 Dec;342(6164):1337–42. DOI PubMed
67. Bornman E. Information society and digital divide in South Africa: results of longitudinal surveys. *Inf Commun Soc* 2016;19. DOI
68. Nsoesie EO, Flor L, Hawkins J, Maharana A, Skotnes T, Marinho F, Brownstein JS. Social Media as a Sentinel for Disease Surveillance: What Does Sociodemographic Status Have to Do with It? *PLoS Curr* 2016;8. DOI PubMed
69. Lloyd-Smith JO, Schreiber SJ, Kopp PE, Getz WM. Superspreading and the effect of individual variation on disease emergence. *Nature* 2005 Nov;438(7066):355–9. DOI PubMed



Prédictions des éclosions de maladies transmises par les moustiques selon les prévisions météorologiques au Canada

NH Ogden^{1*}, LR Lindsay², A Ludwig¹, AP Morse³, H Zheng⁴, H Zhu⁵

Résumé

Les systèmes d'alerte précoce permettant de prédire les éclosions de maladies infectieuses ont été reconnus comme étant une réponse adaptative clé aux changements climatiques. On s'attend à ce que le réchauffement, la variabilité climatique et les phénomènes météorologiques extrêmes associés aux changements climatiques mènent à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des maladies transmises par les moustiques dans le monde entier, ce qui se traduira au Canada par un risque accru d'éclosions de maladies transmises par les moustiques endémiques et émergentes comme le virus du Nil occidental et d'autres maladies transmises par les moustiques. La rapidité de la diffusion d'informations sur le risque imminent d'éclosions de maladies transmises par les moustiques a d'importantes implications sanitaires pour le public, en ce qu'elle permet la mise en œuvre de mesures de contrôle des moustiques et des communications ciblées concernant la nécessité de mesures personnelles de protection — avant l'éclosion de la maladie. Le Canada a mis au point des modèles mécanistes et statistiques fondés sur les données météorologiques afin de prédire les éclosions de virus du Nil occidental, y compris des modèles pour différentes espèces de moustiques vectrices du virus du Nil occidental dans différentes régions du Canada. Bien que les résultats initiaux soient prometteurs, leur mise en œuvre à grande échelle nécessite l'évaluation et la validation approfondies de leurs aptitudes prévisionnelles. Les prévisions fondées sur les données météorologiques pour d'autres maladies transmises par les moustiques émergentes au Canada, comme l'encéphalite équine de l'Est, peuvent également être mises à contribution.

Citation suggérée : Ogden NH, Lindsay LR, Ludwig A, Morse AP, Zheng H, Zhu H. Prédictions d'éclosions de maladies transmises par les moustiques fondées sur les pronostics météorologiques au Canada. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(5):141–7. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v45i05a03f>

Mots-clés : maladies transmises par les moustiques, prévisions fondées sur les données météorologiques, virus du Nil occidental, encéphalite équine de l'Est, changements climatiques, Canada

Introduction

Le Groupe d'experts intergouvernemental des Nations Unies sur l'évolution du climat a identifié une stratégie d'adaptation clé permettant de faire face aux risques des changements climatiques pour la santé, soit la mise au point de systèmes d'alerte précoce (1). Un type de système d'avertissement précoce est la prédiction du risque basée sur les prévisions météorologiques c'est-à-dire d'utiliser les données météorologiques pour prédire le risque d'une éclosion de maladies infectieuses particulières dans une région précise. La recherche sur une grande gamme de maladies transmises par les moustiques, incluant le virus du Nil occidental, la malaria et la fièvre de la vallée du Rift, ont permis de prouver l'efficacité du concept des prévisions basées sur les météorologiques (2). La National Oceanic and Atmospheric Administration des États-Unis a lancé un programme pour faciliter la validation de divers modèles prévisionnels (3).

Parmi les maladies transmises par les moustiques, la plus courante au Canada est celle du virus du Nil occidental qu'on retrouve à l'état endémique dans le sud du pays, et des cas humains ont été recensés presque partout au pays. Chaque année, le virus cause de nombre cas dont la sévérité varie de légère à grave et allant même parfois jusqu'au décès (4). D'autres maladies transmises

Cette oeuvre est mise à la disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0



Affiliations

¹ Laboratoire national de microbiologie, Agence de la santé publique du Canada, Saint-Hyacinthe (Québec)

² Laboratoire national de microbiologie, Agence de la santé publique du Canada, Winnipeg (Manitoba)

³ School of Environmental Sciences, Université de Liverpool, Liverpool (Royaume-Uni)

⁴ Centre des maladies infectieuses d'origine alimentaire, environnementale et zoonotique, Agence de la santé publique du Canada, Ottawa (Ontario)

⁵ Department of Mathematics and Statistics and Laboratory of Mathematical Parallel Systems, York University, Toronto (Ontario)

*Correspondance :

nicholas.ogden@canada.ca



par les moustiques, y compris les virus du séro-groupe Californie (Jamestown Canyon et Snowshoe hare) et le virus de Cache Valley, sont endémiques au Canada. Il existe des preuves que ces maladies sont plus fréquentes chez les humains au Canada que supposé (5,6), et que leur prévalence pourrait augmenter à cause des changements climatiques (7). De plus, d'autres maladies transmises par les moustiques, endémiques à l'heure actuelle aux États-Unis, pourraient migrer vers le nord, soit au Canada, à la faveur des changements climatiques (8), ce qui suscite des inquiétudes croissantes. Il existe également un risque accru que d'autres maladies exotiques transmises par les moustiques, comme la dengue et la fièvre Chikungunya – et les moustiques qui les transmettent – s'établissent au Canada. En raison des changements climatiques, ces moustiques exotiques, qui ont été introduits suite à l'intensification des transports, des échanges de denrées et de matériel à l'échelle internationale, trouvent maintenant au Canada les conditions environnementales dont ils ont besoin pour survivre (9).

Un grand nombre de maladies transmises par les moustiques présentent un comportement épidémique de type sporadique à l'échelle de la planète (10). Ce profil épidémiologique est observé chez le virus du Nil occidental au Canada, ce qui signifie que des épidémies sont présentes certaines années, mais que la maladie se fait discrète d'autres années, où l'on n'observe qu'un petit nombre de cas. En 2007, 2 215 cas ont été déclarés (la plupart recensés lors d'une éclosion dans les provinces des Prairies), en 2010, seulement cinq cas l'ont été et, en 2012, 428 cas (la plupart résultant d'une épidémie en Ontario et au Québec) (4). On croit que cette sporadicité découle surtout des effets de la température sur le cycle de vie du moustique et la transmission du virus du Nil occidental (voir ci-dessous). En 2007, un hiver doux suivi d'un printemps chaud et humide ont fourni les conditions idéales pour le foisonnement de l'espèce *Culex tarsalis* (le principal vecteur du virus du Nil occidental dans les Prairies), alors que la température torride dans l'est du Canada en 2012 peut être suspectée d'avoir accéléré et amplifié la transmission du virus par *Cx. pipiens* et *Cx. restuans* (les principaux vecteurs dans l'est du Canada) (4).

Les méthodes utilisées actuellement pour le contrôle du virus du Nil occidental au Canada consistent à surveiller le moustique (détection des niveaux de risque environnemental), à détecter l'infection chez les animaux sentinelles et à assurer la surveillance humaine (qui permet également d'évaluer la gravité du fardeau de la maladie). Le risque environnemental se mesure par le nombre de moustiques présents dans une zone donnée qui sont infectés et susceptibles de piquer les humains (4). Des hausses tant du nombre de moustiques infectés que du nombre de cas humains se produisent ordinairement de la fin de l'été au début de l'automne (4). Si ces hausses se produisent tôt en saison ou que les augmentations du nombre de moustiques infectés ou de cas humains sont plus importantes que d'habitude, ces chiffres peuvent indiquer qu'une épidémie est sur le point de se produire. Lorsqu'il existe un risque accru lié au virus du

Nil occidental, deux types d'interventions locales de gestion du risque pour la santé publique sont lancées. La première comprend l'utilisation de larvicides et (là où c'est acceptable) d'adulticides (11) afin de contrôler l'abondance des populations de moustiques, et la deuxième intervention vise à sensibiliser du public, en faisant la promotion de mesures de protection personnelle (12).

Le système de surveillance actuel a un désavantage, celui de ne pouvoir détecter les éclosions qu'une fois qu'elles se déclarent. En prenant en compte les effets du climat sur les cycles de vie du moustique et la transmission du virus, il est possible en théorie de prédire les éclosions de maladie causée par les moustiques et de déclencher une intervention des autorités de santé publique avant que l'éclosion ne se déclare (3,13).

Cet article a pour but de décrire les concepts, les méthodes et le statut des prévisions de risque associés au virus du Nil occidental basées sur les prévisions météorologiques au Canada et de déterminer quelles sont les prochaines étapes requises pour la mise en œuvre de ces prévisions en tant qu'outil pour la santé publique.

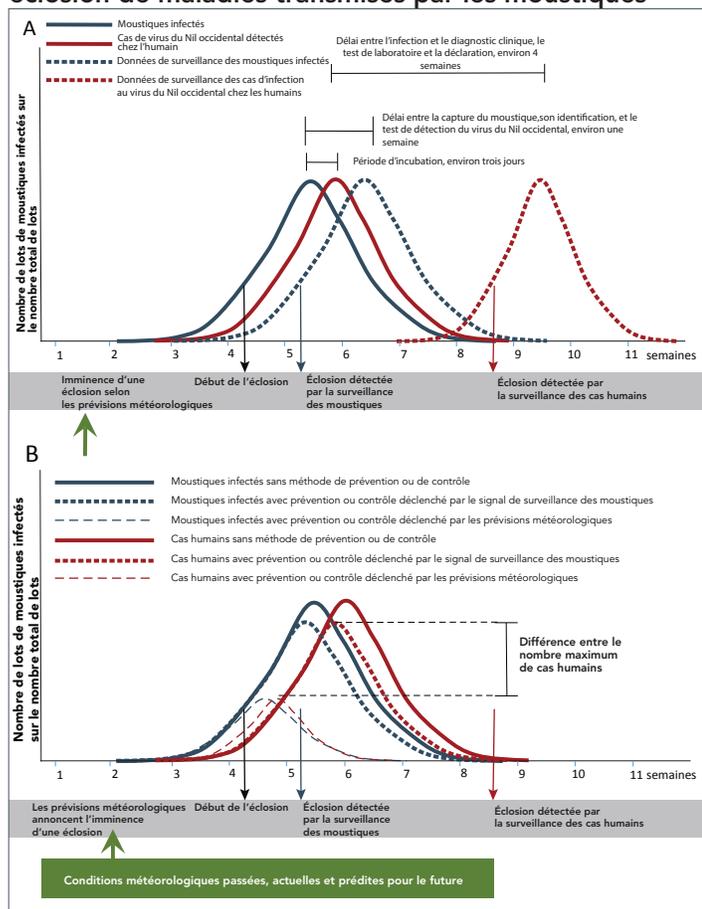
Concepts-clés des modèles prédictifs basés sur les prévisions météorologiques

La prédiction du risque d'exposition aux maladies transmises par les moustiques basée sur les prévisions météorologiques utilise les connaissances sur l'influence de la température ambiante et des précipitations sur le taux de survie et les cycles de vie des moustiques. Par exemple, étant donné que les températures ambiantes ont une influence sur la croissance des œufs, des larves et des pupes, les températures plus élevées accélèrent le cycle de vie du moustique ainsi que la période d'incubation extrinsèque, ou la vitesse à laquelle les pathogènes transmis par le moustique adulte se multiplient et passent de son système digestif aux glandes salivaires où ils sont transmis aux humains (14). Les températures élevées influencent également le niveau d'activité des moustiques adultes. En plus des changements de température, les fluctuations des précipitations peuvent également modifier la taille de la population de moustiques. Les précipitations excessives génèrent souvent des zones d'eau stagnante nécessaire au développement des larves et des pupes, ce qui peut faire augmenter le taux de reproduction des moustiques. À contrario, les sécheresses font en sorte que l'on trouve, en zones urbaines et périurbaines, de l'eau stagnante dans les canaux de drainage où le moustique peut se reproduire. En conséquence, certaines éclosions dans ces régions sont associées tant à la sécheresse qu'aux températures élevées.



Les prédictions du risques basées sur les prévisions météorologiques examinent les conditions associées aux éclosions de maladies transmises par des moustiques, et ces conditions correspondent à un moustique particulier, à une maladie particulière transmise par un moustique dans une zone géographique particulière. La **figure 1** illustre l'éclosion hypothétique d'une maladie transmise par les moustiques, avec ou sans intervention des autorités de santé publique grâce aux prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques. Selon les techniques de surveillance traditionnelle utilisées, il peut s'écouler d'une à quatre semaines entre le début d'une éclosion et sa confirmation (une semaine pour procéder à l'identification des moustiques infectés et quatre semaines pour le diagnostic clinique, les tests de laboratoire et la signalisation d'un patient humain infecté). (figure 1A). Ainsi, au moment où l'éclosion est confirmée, elle est en fait terminée.

Figure 1: Comment les prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques facilitent l'intervention précoce des autorités sanitaires publiques face à une éclosion de maladies transmises par les moustiques



Légende de la figure : dans le diagramme A, la ligne continue indique le nombre de moustiques infectés et d'infections chez les humains en temps réel. La ligne pointillée indique le nombre de moustiques infectés et d'infections chez les humains au moment de leur détection par des systèmes de surveillance. Les lignes horizontales indiquent les raisons et la durée des délais entre les données en temps réel et leur détection au moyen de la surveillance. Dans le diagramme B, on compare le nombre de moustiques infectés et d'infections chez les humains en l'absence d'intervention en santé publique (ligne continue) au nombre d'interventions qui sont lancées à la suite des signaux émis grâce à la surveillance des moustiques (lignes pointillées) ou les prévisions météorologique (lignes en tireté). La flèche noire indique le début d'une éclosion; les flèches de couleurs verte, bleue et rouge indiquent les signaux d'une éclosion qui sont respectivement fournis par les prévisions météorologiques et la surveillance des moustiques et des cas humains. Le rectangle vert indique les prévisions météorologiques actuelles et passées qui servent à mettre au point les données prévisionnelles du nombre de moustiques.

En comparaison, la figure 1B illustre les effets possibles de l'existence d'un signal de risque précoce basé sur les prévisions météorologiques, suivi de l'intervention précoce des autorités sanitaires publiques visant à réduire le nombre de moustiques infectés et la gravité de l'éclosion de maladies transmises par les moustiques (figure 1B).

Types de modèles prédictifs

Les prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques ont été établies à l'aide de modèles mécanistes ou statistiques. Les modèles prédictifs mis au point au Canada sont décrits ci-dessous.

Modèles mécanistes

Les modèles de type mécaniste les plus simples sont ceux qui utilisent des indices de température, obtenus à partir d'essais en laboratoire, pour désigner les étapes importantes du cycle de vie du moustique (p. ex. limites de l'activité du moustique) ou les cycles de transmission du virus. Une méthode (15), élaborée et mise en œuvre en Saskatchewan, se sert d'une simple mesure du nombre de degré-jours accumulés pendant lesquels la température est supérieure à 14,3 °C, soit la température à partir de laquelle le virus du Nil occidental se multiplie dans l'organisme de son vecteur dans les Prairies : le moustique à pattes rayées (*Cx. tarsalis*). Ces données servent ensuite à prévoir la période pendant laquelle le moustique représente un risque élevé pour le public. Des calculs similaires sont utilisées dans des bulletins d'information publique diffusés par des organismes de santé publique au Québec et en Ontario, bien qu'elles n'aient pas été encore évaluées en tant que systèmes d'alerte précoce (16,17). La plupart des modèles de type mécaniste sont des reconstructions mathématiques des cycles de vie du moustique et des cycles de transmission du pathogène. Ces modèles intègrent les effets connus de la température et des précipitations au cycle de vie du moustique, et les effets de la température sur la période d'incubation extrinsèque, de manière à prédire comment les conditions météorologiques récentes et prévues pourront influencer le nombre de moustiques et la proportion d'entre eux qui seront infectés au cours des prochaines semaines par le virus afin de prévoir le risque que courent les humains d'être exposés à un moustique infecté (18). Afin de s'assurer que les modèles prédisent de façon juste et efficace le risque dans un lieu en particulier à fin de mise en œuvre de mesure de prévention et de contrôle, ils devront comporter un grand nombre de paramètres détaillés responsables de l'estimation de facteurs dépendant des conditions météorologiques ou non qui auront une influence sur les cycles de vie du moustique et les cycles de transmission du pathogène. Historiquement, la mise au point de ces modèles visait surtout à prévoir les éclosions de maladies transmises par des moustiques exotiques, comme la malaria en Afrique (19). Au Canada, il n'existe à l'heure actuelle que des connaissances limitées sur l'influence de la température et de la pluie sur différents cycles de vie du moustique.



Un seul modèle de prévisions météorologiques de type mécaniste intégrant la reconstruction des cycles de vie du moustique a été mis au point au Canada. Yu et al. ont mis au point un modèle de type mécaniste du cycle de vie des moustiques *Cx. pipiens* et *Cx. restuans* dans l'est du Canada (20), qui intègre les données sur les effets de la température sur la croissance et la survie du moustique. Ce modèle a bien réussi à refléter les données sur la surveillance du moustique qui ont été utilisées pour sa validation.

Modèles statistiques

Les modèles statistiques se servent du concept de l'« appariement de formes » pour déterminer quelle influence ont les températures et les pluies actuelles et récentes sur le nombre de moustiques et la proportion d'entre eux qui sont infectés de pathogènes (21,22). L'appariement de formes se base sur les données météorologiques récentes et les données actuelles concernant la surveillance du moustique de manière à établir la relation quantitative entre le nombre de moustiques (et les proportions de moustiques qui sont infectés) un jour donné et les précipitations accumulées ou les températures et les précipitations moyennes pour des sites de capture particuliers au cours des semaines et des mois précédents. À l'aide de cette relation et compte tenu des données météorologiques prévues pour les semaines suivantes (données qui ont été tirées des modèles de prévisions météorologiques), on pourra prévoir le nombre de moustiques et la proportion d'entre eux qui sont infectés (23).

Au Canada, quatre modèles statistiques de prévisions météorologiques pour le virus du Nil occidental ont été mis au point, soit dans trois régions où le risque est le plus élevé : les régions méridionales des provinces des Prairies, le sud de l'Ontario et le sud du Québec. En Saskatchewan, on a établi un modèle prédisant tant le nombre de moustiques *Cx. tarsalis* que la proportion de moustiques infectés dans les Prairies, les données sur la température et les précipitations servant de paramètres de prévision (23). Les prévisions du modèle ont été simplement comparées au nombre de cas humains une année donnée sur une période de deux mois à fin de validation; il a permis de prévoir le risque pendant ces deux mois selon une configuration spatiale, risque qui correspondait aux tendances observées pour l'incidence de cas humains. Les trois autres modèles statistiques ont été mis au point au Québec (22) et en Ontario (21,24) où les moustiques vecteurs du virus du Nil occidental sont *Cx. pipiens* et *Cx. restuans*. Tous les modèles ont utilisé les données sur la température et les précipitations comme variables explicatives, et on les a validés en les comparant aux données sur la surveillance des moustiques (21,22,24). L'un des modèles de l'Ontario (21) a été testé dans la région de Toronto par le centre de santé publique de la région de Peel (25). L'incidence des risques observés et prédits au cours de la période d'essai était faible.

Approches en matière de validation

Un certain nombre d'approches différentes existent pour valider des modèles de prévisions fondées sur les données météorologiques. Une de ces approches compare les données issues de méthodes de surveillance traditionnelle (de moustiques, de virus et de cas humains) avec les valeurs prédites par le modèle statistique qui ont été obtenues à l'aide de modèles mécanistes ou statistiques basés sur les prédictions météorologiques locales. Concernant les études menées au Canada à ce jour, cette validation entomologique laisse croire que les deux approches des prévisions fondées sur les données météorologiques sont prometteuses, tant celle de la modélisation statistique que celle de type mécaniste. On a constaté une certaine hétérogénéité spatiale chez les populations de moustiques selon certains éléments probants, ce qui confirme qu'elles peuvent s'adapter aux conditions météorologiques locales. La modulation de la température ou des précipitations attribuable à la topographie locale qui modifie sensiblement l'habitat des moustiques immatures (16,26) en est probablement un facteur explicatif. Ainsi, le fait de prendre en compte la variation topographique locale dans les modèles statistiques améliore leur rendement (22-24).

Une autre approche de la validation, davantage axée sur la santé publique, permet d'estimer la probabilité selon laquelle le modèle prévoit correctement des conditions favorables à une éclosion par opposition à des conditions non favorables (également appelée « aptitudes prévisionnelles » pour ce qui est du modèle de prévisions fondées sur les données météorologiques). L'objectif que vise l'Organisation mondiale de la Santé pour les prédictions concernant la malaria est de pouvoir, de façon acceptable, prédire 60 % des éclosions de malaria dans les deux semaines (13). Un certain nombre de paramètres servent à définir cette capacité, y compris les paramètres basés sur les caractéristiques de l'opérateur à la réception (27), qui quantifient la capacité du modèle à faire preuve d'une sensibilité acceptable (c'est-à-dire un faible nombre de faux négatifs – de sorte que peu d'éclosions n'auront pas été prédites) et d'une spécificité également acceptable (c'est-à-dire un faible nombre de faux positifs – de sorte que peu de fausses alarmes auront été lancées). Le niveau de tolérance au fait de ne pas prédire certaines éclosions ou, au contraire, de lancer de fausses alarmes est une décision que les professionnels de la santé publique et les décideurs politiques doivent assumer, car c'est à eux qu'incombe le fait d'établir le modèle de services de santé publique souhaité.

Discussion

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a fait valoir la nécessité de disposer de systèmes d'alertes précoces comme les prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques pour détecter les éclosions de maladie transmise par les moustiques. Plusieurs modèles de



prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques ont été mis au point au Canada pour le virus du Nil occidental, dont la fréquence des éclosions est susceptible d'augmenter en raison des changements climatiques anticipés. La recherche initiale sur la validation laisse entendre que ces modèles sont très prometteurs, car ils ont le potentiel de fournir des prévisions à court terme sur le risque (c'est-à-dire avec une ou quelques semaines d'avance). Bien que ce type de prévisions puisse être associé à des délais trop courts pour permettre de déclencher des mesures proactives de réduction ayant pour but d'éradiquer les moustiques immatures (agents larvicides), elles permettraient en revanche l'implémentation de deux mesures : contrôle et réduction des populations de moustiques adultes (agents adulticides) et aux alertes lancées auprès du public afin de renforcer l'adoption de méthodes de protection personnelle. En général, le taux d'adoption de méthodes de protection personnelle est faible (28–30), en partie parce que le public considère que le risque est faible. Les prévisions fondées sur les données météorologiques offrent la possibilité de sensibiliser le grand public et de mieux lui faire comprendre le risque, ce qui susciterait l'adoption de mesures de protection personnelles à des endroits et à des époques où le risque imminent est élevé.

Les prévisions fondées sur les données météorologiques en ce qui concerne le virus du Nil occidental seraient un outil utile à une intervention en matière de santé publique qui permettrait de mieux protéger les Canadiens contre les maladies, émergentes et réémergentes, transmises par les moustiques en les avertissant au plus tôt de l'arrivée d'éclosions imminentes. Il y a cependant des limites à leur application. Premièrement, ce type de prévision ne peut remplacer la surveillance des cas humains, des moustiques et des animaux sentinelles, car des facteurs qui ne dépendent aucunement de la température (ou qui ne lui sont qu'indirectement associés) peuvent être à l'origine d'éclosions. Ces facteurs peuvent comprendre des variations de l'immunité du troupeau au sein d'un plus vaste ensemble de populations d'hôtes sauvages ou la présence de souches émergentes de pathogènes associés aux maladies transmises par les moustiques (4). Il est également prudent de maintenir la surveillance des moustiques afin de valider régulièrement les modèles prévisionnels. Deuxièmement, les signes hâtifs en cas de risque imminent lié aux maladies transmises par les moustiques, fournis par les modèles prévisionnels, exigent que les systèmes, les méthodes et les mesures de santé publique puissent réagir rapidement à ces risques, ce qui est le cas dans la plupart des territoires de compétence pratiquant ce type d'intervention en santé publique.

Prédire les éclosions de virus du Nil occidental et d'autres maladies transmises par les moustiques à l'échelle nationale est une possibilité que notre pays doit envisager à l'avenir. La recherche requise avant cette mise en œuvre comprend une validation et une évaluation prospectives des aptitudes prévisionnelles des modèles (notamment une explication de la façon dont le résultat peut varier d'une région à l'autre),

leur adoption et leur application par les utilisateurs finaux et l'élaboration de méthodes permettant de mieux communiquer ce type de risque au public. L'atteinte de ces objectifs exigera des études bien documentées dans un champ concerté et en laboratoire qui seront dirigées par des organismes locaux, provinciaux ou territoriaux et fédéraux ainsi que des simulations informatiques qui seront menées par ces mêmes organismes qui œuvrent en collaboration avec des entomologistes, des écologistes, des épidémiologistes et des mathématiciens rattachés à des institutions de recherche universitaire.

À ce jour, les prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques ont seulement servi aux études sur le virus du Nil occidental au Canada parce qu'il n'existe que très peu de connaissances sur l'écologie d'autres maladies transmises par les moustiques qui sont endémiques au Canada (par exemple, les virus du séro-groupe Californie) et très peu de données sur la surveillance systématique avec lesquelles calibrer et valider les modèles. Mais cet état de fait change et ce sera à l'avenir chose possible grâce à davantage de données qui auront été recueillies de manière systématique.

En général, les modèles fondés sur les données météorologiques sont associés à de meilleures aptitudes prévisionnelles sur de courtes échelles de temps (c'est-à-dire des prédictions à court terme ou prolongées de quelques jours à une semaine) (21) et à de moins bonnes aptitudes prévisionnelles sur une plus longue durée (c'est-à-dire des prédictions à long terme ou saisonnières dont la durée varie de quelques semaines à quelques mois) (31). Cependant, certains modèles prévisionnels à grande portée ont atteint la cible fixée par l'Organisation mondiale de la Santé de 60 % d'aptitudes en matière de prévisions (32). Les modèles de prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques' qui ont le mieux réussi à prévoir les variations de l'amplitude du risque chaque saison, comme la malaria, sont ceux dont l'amplitude dépend du phénomène climatique mondial cyclique, surtout le phénomène d'oscillation australe El Niño (33). Ce genre de modèle prévisionnel n'a pas encore fait l'objet d'une exploration pour le virus du Nil occidental au Canada, notamment à cause des courtes (près de 10 ans) séries chronologiques des données de surveillance (34).

Conclusion

La mise en œuvre future des prévisions fondées sur les données météorologiques du virus du Nil occidental et d'autres maladies transmises par les moustiques permettra de raccourcir le délai avant le lancement d'alertes pour des éclosions imminentes. Comme on s'attend à ce que la fréquence des éclosions de maladies transmises par les moustiques augmente avec les changements climatiques, ces alertes permettront une intervention rapide et précise en santé publique doublée d'une réduction concomitante des répercussions sur la santé publique. L'adoption de modèles de prédictions du risque basées sur les prévisions météorologiques et de leur mise en œuvre par les instances de santé publique au Canada dépend de plus



amples validations et évaluations des aptitudes prévisionnelles de ces modèles, ainsi que de l'exploration du degré avec lequel les modèles prévisionnels doivent être calibrés selon les régions. L'élaboration de prévisions fondées sur les données météorologiques pour d'autres maladies endémiques et émergentes transmises par les moustiques devrait être réalisée grâce à de meilleures connaissances sur l'écologie de ces maladies et à davantage de surveillance systématique.

Déclaration des auteurs

NHO est le principal auteur de l'article, NHO et AL ont conceptualisé l'article, tous les auteurs (NHO, LRL, AL, APM, HZ, HZ) ont contribué à sa rédaction.

Conflit d'intérêts

Aucun.

Financement

Le présent travail a été soutenu par l'Agence de la santé publique du Canada.

Références

1. Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum D, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, Olwoch JM, Revich B, Sauerborn R, Aranda C, Berry H, Butler C, Chafe Z, Cushing L, Ebi KL, Kjellstrom T, Kovats S, Lindsay G, Lipp E, McMichael T, Murray V, Sankoh O, O'Neill M, Shonkoff SB, Sutherland J, Yamamoto S. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press; 2014. Human Health: Impacts, Adaptation, and Co-Benefits. p. 709-54. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap11_FINAL.pdf
2. Zinszer K, Verma AD, Charland K, Brewer TF, Brownstein JS, Sun Z, Buckeridge DL. A scoping review of malaria forecasting: past work and future directions. *BMJ Open* 2012 Nov;2(6):e001992. [DOI PubMed](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2012-001992)
3. Semenza JC. Prototype early warning systems for vector-borne diseases in Europe. *Int J Environ Res Public Health* 2015 Jun;12(6):6333-51. [DOI PubMed](https://doi.org/10.3390/ijerph12066333)
4. Agence de la santé publique du Canada. Surveillance du virus du Nil occidental. Ottawa (ON): ASPC; 2018. (Accédé 2018-10-25). <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/virus-nil-occidental/surveillance-virus-nil-occidental.html>
5. Kulkarni MA, Lecocq AC, Artsob H, Drebot MA, Ogden NH. Epidemiology and aetiology of encephalitis in Canada, 1994-2008: a case for undiagnosed arboviral agents? *Epidemiol Infect* 2013 Nov;141(11):2243-55. [DOI](https://doi.org/10.1017/S0950268813001111)
6. Drebot MA. Bunyavirus transmis par les moustiques émergents au Canada. *Relevé des maladies transmissibles au Canada*. 2015 Jun;41(6):133-41. [DOI PubMed](https://doi.org/10.1017/S0950268815000111)
7. Ludwig A, Zheng H, Vrbova L, Drebot MA, Iranpour M, Lindsay LR. Augmentation du risque de maladies endémiques transmises par des moustiques au Canada en raison du changement climatique. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(4):99-107. [DOI](https://doi.org/10.1017/S0950268819000111)
8. Ng V, Rees EE, Lindsay LR, Drebot MA, Brownstone T, Sadeghieh T, Khan SU. Les changements climatiques pourraient-ils entraîner la propagation de maladies exotiques transmises par les moustiques au Canada? *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(4):108-18. [DOI](https://doi.org/10.1017/S0950268819000111)
9. Ogden NH, Gachon P. Changements climatiques et maladies infectieuses : À quoi pouvons-nous nous attendre? *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(4):83-8. [DOI](https://doi.org/10.1017/S0950268819000111)
10. Githeko AK, Lindsay SW, Confalonieri UE, Patz JA. Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. *Bull World Health Organ* 2000;78(9):1136-47. [PubMed](https://doi.org/10.1186/14752875789113647)
11. Reisen W, Brault AC. West Nile virus in North America: perspectives on epidemiology and intervention. *Pest Manag Sci* 2007 Jul;63(7):641-6. [DOI PubMed](https://doi.org/10.1002/ps.1411)
12. Agence de la santé publique du Canada. Prévention du virus du Nil occidental. Ottawa (ON) : ASPC; 2018. <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/virus-nil-occidental/prevention-virus-nil-occidental.html>
13. World Health Organization. 2005-2010 Roll Back Malaria: Global strategic plan. Geneva (CH): WHO; 2005. www1.paho.org/hq/dmdocuments/2010/mal-2005-cor-1.pdf
14. Ogden NH, Lindsay LR. Effects of climate and climate change on vectors and vector-borne diseases: ticks are different. *Trends Parasitol* 2016 Aug;32(8):646-56. [DOI PubMed](https://doi.org/10.1016/j.pt.2016.06.001)
15. Government of Saskatchewan. West Nile Virus Surveillance Report, 2018: June 23. <http://publications.gov.sk.ca/documents/13/107167-West-Nile-Virus-Surveillance-Report-Week-of-June-23-2018.pdf>
16. Public Health Ontario. West Nile Virus surveillance. www.publichealthontario.ca/en/dataandanalytics/pages/wnv.aspx
17. Institut national de santé publique du Québec. Rapport de surveillance du virus du Nil occidental et autres arbovirus transmis par les moustiques au Québec. www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2455_surveillance_virus_nil_occidental_arbovirus.pdf
18. Hoshen MB, Morse AP. A weather-driven model of malaria transmission. *Malar J* 2004 Sep;3:32. [DOI PubMed](https://doi.org/10.1186/14752875040000332)
19. Diouf I, Rodriguez-Fonseca B, Deme A, Caminade C, Morse AP, Cisse M, Sy I, Dia I, Ermert V, Ndione JA, Gaye AT. Comparison of malaria simulations driven by meteorological observations and reanalysis products in Senegal. *Int J Environ Res Public Health* 2017 Sep;14(10):E1119. [DOI PubMed](https://doi.org/10.3390/ijerph14101119)
20. Yu D, Madras N, Zhu H. Temperature-driven population abundance model for *Culex pipiens* and *Culex restuans* (Diptera: culicidae). *J Theor Biol* 2018 Apr;443:28-38. [DOI PubMed](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2017.12.011)



21. Wang J, Ogden NH, Zhu H. The impact of weather conditions on *Culex pipiens* and *Culex restuans* (Diptera: Culicidae) abundance: a case study in Peel Region. *J Med Entomol*. 2011;48(2):468-75. [PubMed](#)
22. Ripoché M, Campagna C, Ludwig A, Ogden NH, Leighton PA. Short-term forecasting of daily abundance of West Nile virus vectors *Culex pipiens-restuans* and *Aedes vexans* based on weather conditions and larvicide use in southern Québec (Canada). *J Med Entomol* 2019;56(3):1-14. [DOI](#)
23. Chen CC, Epp T, Jenkins E, Waldner C, Curry PS, Soos C. Modeling monthly variation of *Culex tarsalis* (Diptera: Culicidae) abundance and West Nile Virus infection rate in the Canadian Prairies. *Int J Environ Res Public Health* 2013 Jul;10(7):3033-51. [DOI PubMed](#)
24. Gao X, Cao YR, Ogden N, Aubin L, Zhu HP. Mixture Markov regression model with application to mosquito surveillance data analysis. *Biom J* 2017 May;59(3):462-77. [DOI PubMed](#)
25. Laboratory of Mathematical Parallel Systems. Mosquito Abundance and West Nile Risk Yearly Forecasting for Peel Region. www.lamps.yorku.ca/yearly-forecast-graphs
26. Yusa A, Berry P, J Cheng J, Ogden N, Bonsal B, Stewart R, Waldick R. Climate change, drought and human health in Canada. *Int J Environ Res Public Health* 2015 Jul;12(7):8359-412. [DOI PubMed](#)
27. MacLeod DA, Jones A, Di Giuseppe F, Caminade C, Morse AP. Demonstration of successful malaria forecasts for Botswana using an operational seasonal climate model. *Environ Res Lett*. 2015;10(4): 044005. [DOI](#)
28. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Knowledge, attitudes, and behaviors about West Nile virus-Connecticut, 2002. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 2003 Sep;52(37):886-8. www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5237a4.htm [PubMed](#)
29. Wilson SD, Varia M, Lior LY; Field Epidemiology Summer Course. West Nile Virus: the buzz on Ottawa residents' awareness, attitudes and practices. *Can J Public Health* 2005 Mar-Apr;96(2):109-13. [PubMed](#)
30. Trumbo CW, Harper R. Perceptual influences on self-protective behavior for West Nile virus, a survey in Colorado, USA. *BMC Public Health* 2015 Jun;15:557. [DOI PubMed](#)
31. Gouvernement du Canada. Habilité du système de prévisions déterministes. 2019. https://meteo.gc.ca/saisons/skill_f.html
32. Lauderdale JM, Caminade C, Heath AE, Jones AE, MacLeod DA, Gouda KC, Murty US, Goswami P, Mutheneni SR, Morse AP. Towards seasonal forecasting of malaria in India. *Malar J* 2014 Aug;13:310. [DOI PubMed](#)
33. Thomson MC, Doblaz-Reyes FJ, Mason SJ, Hagedorn R, Connor SJ, Phindela T, Morse AP, Palmer TN. Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles. *Nature* 2006 Feb;439(7076):576-9. [DOI PubMed](#)
34. Manore CA, Davis J, Christofferson RC, Wesson D, Hyman JM, Mores CN. Towards an early warning system for forecasting human west nile virus incidence. *PLoS Curr* 2014 Mar;6. [DOI PubMed](#)



Utilisation des images d'observation de la terre pour améliorer la cartographie des risques de maladies associées au changement climatique

SO Kotchi^{1*}, C Bouchard¹, A Ludwig¹, EE Rees¹, S Brazeau¹

Résumé

Le nombre de cas de plusieurs maladies infectieuses liées au climat chez l'humain, y compris les maladies transmises par les tiques et les moustiques, a augmenté au Canada et dans d'autres parties du monde depuis la fin du siècle dernier. Une nouvelle méthode utilisant des images satellites pour cerner les déterminants environnementaux et climatiques permettant de prévoir et de cartographier les risques associés à ces maladies contribue à appuyer les activités de recherche, de surveillance, de prévention et de contrôle, et aider à mieux évaluer les impacts du changement climatique au Canada. Il est possible d'utiliser les images d'observation de la Terre afin de surveiller les changements à la surface de la planète et dans l'atmosphère de façon systématique, et ce, à différentes échelles temporelles et spatiales. Ces images peuvent éclairer l'estimation et la surveillance des déterminants environnementaux et climatiques, et donc aussi la prévision des maladies et la cartographie des risques. Le réseau actuel de satellites d'observation de la Terre produit une grande quantité et une grande variété de données. Ces données présentent différentes caractéristiques en termes de précision et de résolution spatiales, temporelles et thématiques. Le présent aperçu vise à décrire comment les images d'observation de la Terre peuvent éclairer l'évaluation des risques et la cartographie des maladies transmises par les tiques et les moustiques au Canada, leurs potentiels avantages et limites, les répercussions et les prochaines étapes.

Citation suggérée : Kotchi SO, Bouchard C, Ludwig A, Rees EE, Brazeau S. Utilisation des images d'observation de la terre pour améliorer la cartographie des risques de maladies associées au changement climatiques. *Relevé des maladies transmissibles au Canada*, 2019;45(5):148–58. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v45i05a04f>

Mots-clés : Images d'observation de la Terre, changement climatique, cartographie des risques, maladies infectieuses, maladies transmises par les tiques, maladies transmises par les moustiques, télédétection, déterminants environnementaux, déterminants climatiques, Canada

Introduction

Le changement climatique a entraîné une hausse des températures et du niveau des océans, une variabilité climatique accrue et des changements dans la fréquence et l'intensité des précipitations (1,2). Les premiers signes de changements climatiques au Canada remontent aux années 1950 (3–6) et la température moyenne a augmenté de plus de 1,5 °C entre 1950 et 2010, soit près du double de la moyenne mondiale (7). L'ampleur de ce changement varie d'une région à l'autre, les changements les plus importants s'étant produits dans le Nord du Canada et plus particulièrement dans l'Arctique (8). Les taux d'humidité moyens au Canada ont également augmenté, avec une augmentation moyenne des précipitations d'environ 12 % (8). Ces tendances devraient se poursuivre, avec une augmentation de l'intensité et de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations et les feux de forêt (5,6,8–10). L'urbanisation et la création d'îlots de chaleur qui en découle ont contribué à ces changements climatiques (11).

Le climat a un impact direct sur les mouvements des populations humaines et des vecteurs de maladies infectieuses, tels que les tiques et les moustiques, et sur leurs populations hôtes (12,13). L'augmentation de la température et la variabilité du climat entraînent une augmentation et une expansion géographique des populations de vecteurs et des maladies qu'ils transmettent (1,7,11,14–22). Par exemple, de nombreuses études ont démontré l'expansion des tiques vers le Nord, ce qui a été associé à une augmentation constante du nombre de cas de la maladie de Lyme chez l'humain (23–25). Une étude prévoit que l'incidence du virus du Nil occidental augmentera probablement de plus de 17 fois d'ici 2050 (26). Avec l'expansion vers le Nord du moustique *Aedes albopictus* aux États-Unis (É.-U.) (27,28), l'Amérique du Nord pourrait être confrontée à des maladies exotiques transmises par les moustiques comme la dengue, le Zika, la fièvre jaune et le Chikungunya. D'autres maladies transmises par les tiques et les

Cette oeuvre est mise à la disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0



Affiliation

¹ Division Science des risques pour la santé publique, Laboratoire national de microbiologie, Agence de la santé publique du Canada, Saint-Hyacinthe (Québec)

*Correspondance :

serge-olivier.kotchi@canada.ca



moustiques sont susceptibles d'augmenter ou d'émerger au Canada en raison du réchauffement planétaire (26,27,29–31).

En raison de l'interaction entre le changement climatique et les maladies à vecteurs, il est de plus en plus important de pouvoir mesurer les changements de température, de précipitations et autres variables relatives à l'habitat. Le Canada est un vaste pays et les stratégies de surveillance actuelles ne sont pas conçues pour surveiller l'impact du changement climatique sur la propagation géographique des maladies transmises par les tiques et les moustiques. Les outils d'observation de la Terre sont de plus en plus utilisés d'une façon qui accroît notre capacité à effectuer cette surveillance. L'observation de la Terre désigne l'acquisition, le traitement, l'analyse, l'interprétation et la diffusion d'informations physiques, chimiques et biologiques sur la terre, les océans et l'atmosphère au moyen de capteurs de télédétection satellitaire, aéroportée ou *in situ*. Les technologies de télédétection, qui mesurent les propriétés d'un objet au moyen d'ondes électromagnétiques, peuvent être utilisées en combinaison avec de nombreux autres capteurs terrestres comme les stations météorologiques et les ballons-sondes (32).

Cet aperçu porte sur les images d'observation de la Terre acquises par les satellites de télédétection. Les images d'observation de la Terre et leurs dérivés fournissent des données sur la température, les précipitations, l'humidité, la forêt, les terres humides, l'agriculture, les milieux bâtis et plus encore. Plusieurs études ont démontré l'efficacité des images d'observation de la Terre et de leurs dérivés pour l'évaluation des risques et la cartographie des maladies transmises par les tiques et les moustiques dans le monde. Le Malaria Atlas Project (MAP) (33,34), l'Epidemic Prognosis Incorporating Disease and Environmental Monitoring for Integrated Assessment (EPIDEMIA) (35) et le Mapping Malaria Risk in Africa (MARA) (36,37) sont des exemples de programmes de surveillance qui ont recours aux images d'observation de la Terre et leurs dérivés. Les images d'observation de la Terre sont également utilisées pour suivre les maladies transmises par les tiques et les moustiques et évaluer les conditions géographiques et climatiques de leur propagation au Canada. Le présent aperçu vise à décrire comment les images d'observation de la Terre peuvent éclairer l'évaluation et la cartographie des risques des maladies transmises par les tiques et les moustiques au Canada afin d'en assurer la surveillance et à cerner leurs avantages et leurs limites éventuelles, les répercussions et les prochaines étapes.

Les images d'observation de la Terre pour l'évaluation et la cartographie des risques

Les images d'observation de la Terre ne permettent évidemment pas d'observer directement les tiques et les moustiques dans leurs habitats. Elles permettent plutôt d'obtenir des données sur des variables et des indicateurs qui servent à caractériser les déterminants environnementaux et climatiques (DEC) qui

influencent la présence et le développement des tiques et des moustiques. Les images d'observation de la Terre permettent d'obtenir les données sur les DEC grâce à plusieurs méthodes de traitement et d'analyse, y compris des corrections géométriques, radiométriques et atmosphériques, et des analyses de classification des images. Les DEC qui en résultent comprennent la température de surface, la température de l'air, l'humidité du sol, l'humidité de surface, la vapeur d'eau atmosphérique, l'humidité de l'air, la quantité de précipitations, la topographie, la couverture et l'épaisseur de la neige, le type de sol, le type de végétation et sa densité, les indices de végétation, les zones inondées, les milieux humides, les paramètres liés à la qualité des eaux (tels la concentration en chlorophylle, la matière organique dissoute, les sédiments en suspension, la couleur et la salinité), les forêts, les zones forestières, urbaines ou bâties ainsi que les zones agricoles (33,38–40). Ainsi, de nombreux DEC dérivés des images d'observation de la Terre sont des déterminants importants de la survie et de l'abondance des vecteurs des maladies transmises par les tiques et les moustiques. Le **Tableau 1** présente une liste des satellites d'observation de la Terre les plus couramment utilisés, leurs capteurs et les DEC qui en sont dérivés.

Maladies transmises par les moustiques

Les déterminants environnementaux et climatiques (DEC) des maladies transmises par les moustiques comprennent à la fois les milieux anthropiques (comme les zones urbaines, périurbaines et rurales) et les milieux naturels (comme les forêts et les milieux humides) (7,17,49–52). Ces DEC comportent également des facteurs climatiques et microclimatiques connus pour avoir une incidence sur la propagation des maladies transmises par les moustiques, comme la température, l'humidité et les précipitations (17,20,52–54). Certaines espèces de moustiques ont également des DEC particuliers. Des espèces, comme *Aedes albopictus* (qui propage le virus de la dengue, du Chikungunya et du Zika) ou *Culex pipiens* (qui propage le virus du Nil occidental), sont très bien adaptées aux milieux urbains. D'autres espèces, comme *Culiseta melanura* (qui propage l'encéphalite équine de l'Est), sont propres aux milieux humides naturels et se trouvent uniquement dans des zones rurales.

Maladies transmises par les tiques

Les DEC des maladies transmises par les tiques diffèrent également selon les espèces. Le vecteur de la maladie de Lyme, *Ixodes scapularis*, a évolué dans les biomes forestiers tempérés (feuillus mixtes) en Amérique du Nord, tandis que le vecteur du virus de Powassan, *Ixodes cookei*, vit principalement dans des terriers et plus rarement sur la végétation. Historiquement, les changements dans la répartition de divers types d'habitats et des espèces hôtes ont été accompagnés de changements dans la répartition et l'abondance des tiques (55). Les DEC des maladies transmises par les tiques comprennent le type et la densité du couvert forestier et le degré de fragmentation de la forêt, ainsi que les conditions de température et d'humidité prévalant dans les habitats forestiers (12,13,17, 56–63).



Tableau 1 : Images d'observation de la Terre en service en accès libre et les déterminants environnementaux et climatiques qui en sont dérivés

Satellite Nom	Capteur	Rés. spatiale	Rés. temp.	Déterminants environnementaux et climatiques dérivés											
				Couv. sols	Type sol	Type vég.	Qté vég.	Prof. couv. neige	Qual. eau	Hum. surf.	Temp. surf.	Temp. air	Vap. d'eau	Préc.	
Aqua	AIRS	2,3–41 km	0,5 jour	-	-	-	-	-	-	-	-	Y	Y	-	-
DMSP	SSM/I	13–69 km	1 jour	-	-	-	-	Y	-	-	-	-	-	Y	Y
GCOM-W1	AMSR-2	3–62 km	1 jour	-	-	-	-	Y	Y	-	-	-	-	Y	Y
GPM	DPR	5 km	1–2 heures	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Y
GPM	GMI	4–32 km	1–2 heures	-	-	-	-	-	-	-	-	Y	-	Y	Y
Landsat-5	TM	30–120 m	16 jours	Y	Y	Y	Y	Y	-	Y	Y	-	-	-	-
Landsat-7	ETM+	15–60 m	16 jours	Y	Y	Y	Y	Y	-	Y	Y	-	-	-	-
Landsat-8	OLI	15–30 m	16 jours	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-	-	-	-	-
Landsat-8	TIRS	100 m	8 jours	-	-	-	-	-	-	-	Y	-	Y	-	-
MSG	SEVIRI	1–4,8 km	15 min	-	-	-	Y	-	-	Y	Y	-	Y	Y	-
NOAA 15-19	AVHRR/3	1,1 km	0,5 jour	Y	-	-	Y	Y	-	Y	Y	-	Y	-	-
Sentinel-1	C-SAR	5–00 m	12 jours	Y	-	Y	Y	Y	-	-	-	-	-	-	-
Sentinel-2	MSI	10–60 m	5 jours	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-	-	-	-	-
Sentinel-3	OLCI	300 m	2 jours	Y	-	-	Y	-	Y	-	-	-	-	-	-
Sentinel-3	SLSTR	500-1000 m	1–4 jours	-	-	-	Y	Y	-	-	Y	-	-	-	-
SMAP	MWR	40 km	1,5 jour	-	-	-	-	-	Y	Y	-	-	-	-	-
SNPP	ATMS	16–75 km	0,5 jour	-	-	-	-	-	-	Y	-	Y	-	-	-
SNPP	VIIRS	375–750 m	6 min	-	-	-	Y	Y	-	Y	Y	-	Y	-	-
Terra	ASTER	15–90 m	5 jours	Y	Y	-	Y	Y	-	-	Y	-	Y	-	-
Terra, Aqua	MODIS	250–1000 m	5 min	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-

Abréviations : Couv., couverture; Hum., Humidité; Préc., précipitations; Qté, quantité; Qual., qualité; Rés., résolution, Surf. Surface; Temp., température; Vap., Vapeur; Vég., végétation; Y, images acquises par le système satellite/capteur; -, sans objet

Noms des satellites : DMSP, Defense Meteorological Satellite Program; GCOM, Global Change Observation Mission; GPM, Global Precipitation Measurement Mission; MSG, Meteosat Second Generation; NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration; SMAP, Soil Moisture Active Passive; SNPP, Suomi National Polar-orbiting Partnership Satellite

Noms des capteurs : AIRS, sondeur infrarouge de l'atmosphère; AMSR, radiomètre à balayage hyperfréquence de pointe; ASTER, radiomètre spatial avancé d'émission et de réflexion thermiques; ATMS, sondeur à microondes à technologie avancée; AVHRR, radiomètre perfectionné à très haute résolution; C-SAR, radar à antenne synthétique bande C; DPR, radar de précipitation bifréquence; ETM+, appareil de cartographie thématique plus amélioré; GMI, imageur à micro-ondes pour la mesure des précipitations mondiales; MODIS, spectroradiomètre imageur à résolution moyenne; MSI, imageur multispectre; MWR, radiomètre à micro-ondes; OLCI, instrument de mesure de la couleur de l'océan et du terrain; OLI, imageur de terrain opérationnel; SEVIRI, imageur rotatif amélioré visible et infrarouge; SLSTR, Radiomètre de la température de la mer et de la surface terrestre; SSM/I, imageur à hyperfréquences à capteur spécial; TIRS, capteur thermique infrarouge; TM, appareil de cartographie thématique; VIIRS, radiomètre à balayage dans le visible et l'infrarouge (41–48)

Évaluations des risques

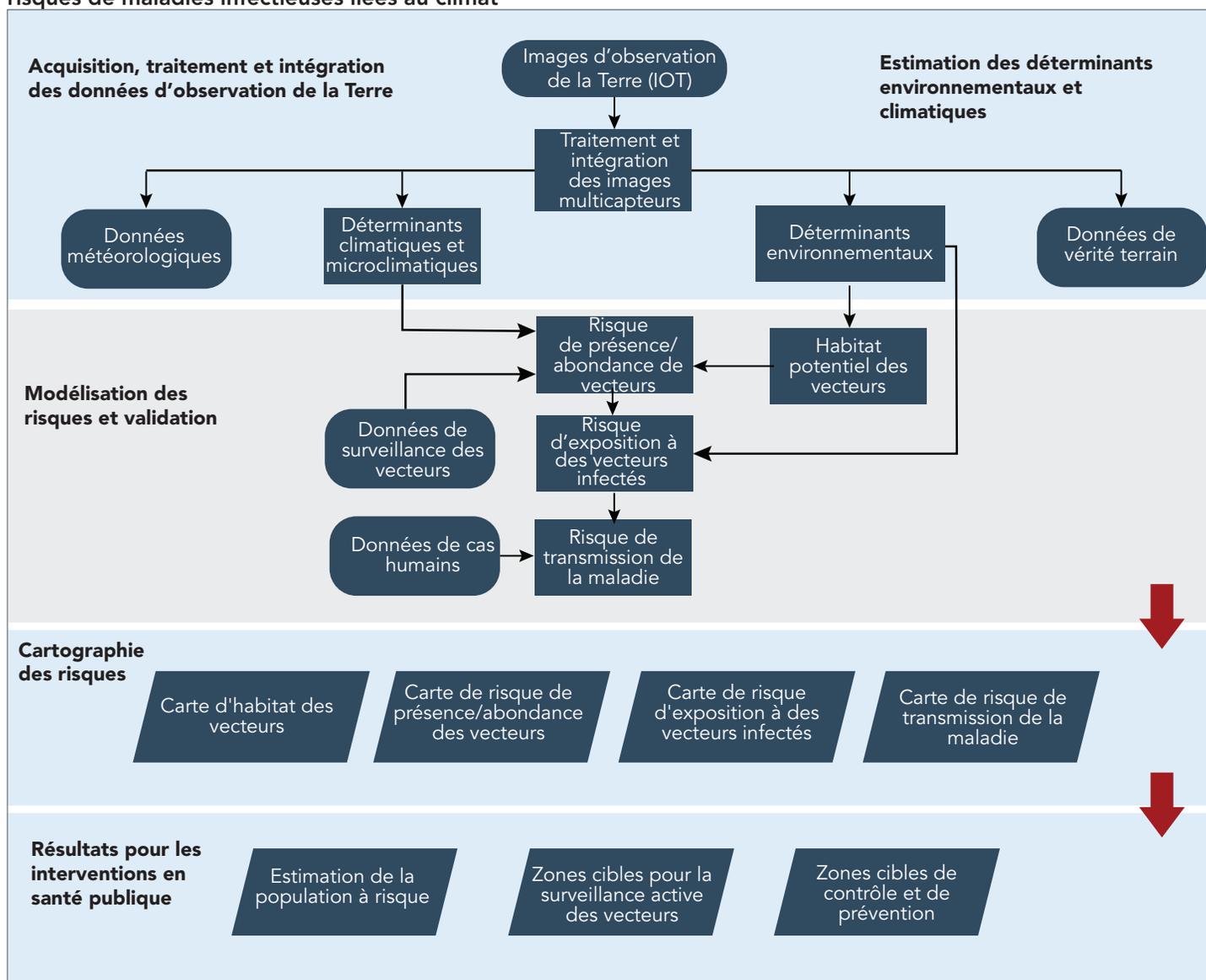
Il est possible d'utiliser les DEC dérivés des images d'observation de la Terre pour évaluer les risques associés à différentes maladies liées au climat (49,50,52,64–69). La possibilité d'une infection chez l'humain dépend d'une série de risques : le risque que les vecteurs en cause soient présents dans l'environnement; le risque que ces vecteurs soient contaminés par un pathogène; le risque que les populations humaines soient exposées à ces vecteurs; le risque de transmission de la maladie. Les DEC, dérivés des images d'observation de la Terre, combinés aux données de surveillance, permettent d'évaluer, de modéliser et de cartographier ces différents composants du risque. Les

images d'observation de la Terre et leurs dérivés peuvent servir à cartographier les risques sur une base régulière une fois que le modèle de risque basé sur ces données est développé et validé.

L'utilisation la plus courante des images d'observation de la Terre pour l'évaluation et la cartographie des risques est la surveillance des risques environnementaux associés à la présence ou à l'abondance des tiques et des moustiques. Les DEC dérivés des images d'observation de la Terre peuvent également être combinés avec des données de cas humain pour évaluer et cartographier directement le risque de transmission de la maladie. La **figure 1** présente un exemple de structure



Figure 1 : Structure opérationnelle fondée sur l'observation de la Terre pour l'évaluation et la cartographie des risques de maladies infectieuses liées au climat



opérationnelle fondée sur l'observation de la Terre que l'on peut utiliser pour l'évaluation et la cartographie des risques de maladies infectieuses liées au climat.

Avantages et limites

Les données provenant des images d'observation de la Terre et de leurs dérivés présentent de nombreux avantages par rapport aux autres types de données pour estimer les DEC et cartographier le risque de transmission des maladies infectieuses liées au climat (17,22,70,71). Les images d'observation de la Terre présentent au moins cinq avantages potentiels pour l'évaluation des risques pour la santé publique liés aux maladies à vecteurs au Canada.

Premièrement, le Canada est un vaste pays qui n'est pas actuellement entièrement couvert par des données d'observation sur le terrain, utilisées dans les méthodes

traditionnelles de surveillance (p.ex. piégeage et analyse de la densité et du type de moustiques ou cartographie des habitats des tiques par la recherche des tiques). Ces données de surveillance traditionnelles ne couvrent généralement qu'un nombre limité de sites de surveillance dont la répartition est inégale entre les provinces. Les images d'observation de la Terre couvrent quant à elles des surfaces continues du pays, où chaque point du territoire observé est un « site de surveillance ». De plus, ces images peuvent couvrir de vastes régions géographiques comme le Canada dans un délai (minutes, heures ou jours, selon le satellite utilisé) qui ne peut être égalé par les méthodes de surveillance traditionnelles.

Deuxièmement, le Canada compte de nombreuses régions éloignées difficiles d'accès. Ces régions sont couvertes par des images d'observation de la Terre au même titre que le reste du pays. Ceci offre l'avantage unique de pouvoir surveiller de



façon continue même les régions les plus éloignées. Cela est particulièrement important au Canada, car certaines de ces régions éloignées, comme l'Arctique, sont affectées de façon disproportionnée par le changement climatique.

Troisièmement, l'utilisation d'images d'observation de la Terre permet de répondre au problème du coût élevé de la surveillance active sur une vaste zone géographique. Il est possible d'accéder librement aux images d'observation de la Terre acquises par plusieurs satellites sur des plateformes de données ouvertes ou à faible coût. Au Canada, il existe une grande quantité de données dérivées d'images d'observation de la Terre prêtes à l'emploi. Ces données sont produites par des ministères fédéraux comme Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ressources naturelles Canada et Environnement et Changement climatique Canada. Elles sont disponibles gratuitement sur le site Web ouvert du gouvernement (<https://ouvert.canada.ca/fr/donnees-ouvertes>).

Quatrièmement, les méthodes et protocoles de surveillance active varient selon les projets, les années, les programmes et les administrations. En raison de cette variabilité, il est difficile d'établir des comparaisons dans le temps et entre divers lieux. Pour leur part, l'acquisition des images d'observation de la Terre se fait de façon standardisée et sur une base régulière. Cela permet de comparer les détections de signaux (p.ex. situations anormales et alertes) d'une manière plus efficace dans l'ensemble du pays.

Cinquièmement, les satellites d'observation de la Terre peuvent être mobilisés rapidement pour appuyer des opérations d'urgence en temps réel en cas de catastrophe majeure qui présente des risques pour la santé publique. Par exemple, dans le cas d'une inondation, il est possible d'utiliser des images d'observation de la Terre pour délimiter et surveiller les zones à risque où des activités de lutte contre les moustiques peuvent être requises. La *Charte internationale « Espace et catastrophes majeures »* (72) a pour but de faciliter la mobilisation des satellites d'observation de la Terre de diverses agences

Tableau 2 : Avantages de l'utilisation des images d'observation de la Terre pour l'estimation des déterminants environnementaux et climatiques et la cartographie des risques de maladies infectieuses liées au climat

Avantage	Description
Mesures précises et régulières à différentes résolutions spatiales et temporelles	L'homogénéité et la régularité des observations faites à l'aide d'images d'observation de la Terre permettent de mesurer avec plus de précision les changements survenus au fil du temps, comme les changements environnementaux et climatiques, comparativement aux données recueillies sur le terrain. Ces mesures sont effectuées à différentes résolutions spatiales et temporelles, ce qui permet d'observer des phénomènes (par exemple, habitats des vecteurs, conditions microclimatiques) et leurs changements selon un spectre varié d'échelles allant de 0,31 m à 75 km et de fréquences temporelles allant de 5 minutes à 16 jours. Cette capacité d'observation multiéchelle qu'offrent les images d'observation de la Terre est unique et permet d'estimer les DEC et de cartographier les risques à l'échelle locale, régionale et globale en fonction des objectifs de santé publique.
Haute densité spatiale des observations, avec la couverture de vastes territoires, de régions éloignées et de zones difficiles d'accès	Les mesures effectuées à l'aide d'images d'observation de la Terre consistent en des données continues couvrant l'ensemble de la zone géographique couverte par le capteur. Il est possible d'estimer les DEC et de cerner les zones à faible risque ou à risque élevé pour toutes les parties du territoire. Les images d'observation de la Terre couvrent d'immenses territoires qui ne peuvent être échantillonnés avec des données recueillies sur le terrain. La plupart des satellites d'observation de la Terre peuvent capter des images couvrant la planète entière, y compris les régions éloignées et les zones géographiques difficiles d'accès. Ceci est très utile pour appuyer les initiatives de santé publique qui ciblent les collectivités éloignées.
Récurrence des observations sur une longue période	Les images d'observation de la Terre sont acquises de façon récurrente depuis près de 40 ans. La capacité d'observation d'un territoire donné sur de longues périodes offre une excellente occasion d'étudier et de prévoir l'impact du changement climatique sur l'émergence et la réémergence des maladies liées au climat.
Dérivés d'images d'observation de la Terre prêts à l'emploi	De nombreux produits prêts à l'emploi ont été développés à partir d'images d'observation de la Terre pour rendre ces données accessibles à une communauté plus large de personnes non expertes dans le traitement et l'analyse de ces images. Ces produits se rapportent à la fois aux déterminants environnementaux et aux déterminants climatiques.
Accès à de grandes quantités de données à faible coût	Plus de 1 700 satellites d'observation de la Terre sont en service (74). Les images d'observation de la Terre de ces nombreux satellites ainsi que la plupart des dérivés sont accessibles gratuitement sur des plateformes de données ouvertes. La majorité des images commerciales d'observation de la Terre comportent des données à très haute résolution spatiale (moins de 2 m). Les coûts associés à ces données diminuent rapidement avec l'augmentation du nombre de systèmes d'observation de la Terre et l'amélioration de leur performance.
Rapidité de mobilisation de nombreux satellites pour appuyer les opérations d'urgence	En vertu de la <i>Charte internationale « Espace et catastrophes majeures »</i> (72), les satellites et les services peuvent être rapidement mobilisés par de nombreuses agences spatiales pour appuyer la gestion des situations d'urgence dans les grandes zones sinistrées. Ils permettent d'évaluer rapidement les risques d'épidémies dans ces zones alors que le nombre de catastrophes majeures augmente avec le changement climatique. La Charte est en vigueur depuis l'an 2000. Elle a été mobilisée pour appuyer les interventions liées à l'éclosion du virus Ebola en Afrique de l'Ouest en 2014 (73). C'était la première fois que la Charte était mobilisée pour la gestion d'une maladie infectieuse.



spatiales à l'appui des opérations d'urgence liées aux grandes catastrophes. Cette charte a été appliquée pour la première fois dans le cadre d'une maladie infectieuse lors de l'épidémie d'Ebola en Afrique de l'Ouest en 2014 (73). Le **tableau 2** résume les avantages de l'utilisation des images d'observation de la Terre et de leurs dérivés.

Limites

L'utilisation des images d'observation de la Terre et de leurs dérivés comporte un certain nombre de limites. Premièrement, les dérivés d'images d'observation de la Terre sont conçus à l'origine pour d'autres domaines d'application, notamment l'agriculture, la foresterie et la conservation de la nature, et les indicateurs de qualité des données relatifs à ces dérivés sont principalement destinés à répondre aux objectifs de ces applications initiales. Cela signifie qu'il y a un manque de dérivés d'images d'observation de la Terre spécifiquement développés pour des maladies infectieuses comme les maladies transmises par les tiques et les moustiques. Par conséquent, plusieurs indicateurs de qualité des données (couverture géographique, résolution spatiale, résolution temporelle, échelle d'agrégation temporelle, fréquence de mise à jour, période d'archivage, composition des classes thématiques et exactitude des données) relatifs aux images d'observation de la Terre communément utilisées et leurs dérivés ne répondent pas aux critères de qualité des données nécessaires à l'estimation des DEC associés aux maladies infectieuses liées au climat.

Deuxièmement, les images d'observation de la Terre les plus utilisées pour l'estimation des déterminants climatiques et microclimatiques ont rarement une résolution spatiale et temporelle élevée. Par exemple, la température de surface et l'humidité du sol peuvent varier considérablement d'un endroit à l'autre et dans le temps. Les images d'observation de la Terre utilisées pour les calculer ne permettent pas de combiner une résolution spatiale élevée (moins de 30 m) avec une résolution temporelle élevée (moins d'un jour) (17,68,75); cependant, cette combinaison est nécessaire pour caractériser la dynamique des conditions microclimatiques et les microhabitats des vecteurs. Ainsi, ces données ne permettent pas toujours de mener des activités de contrôle et de prévention à l'échelle locale (p. ex. pour une municipalité).

Troisièmement, l'utilisation des images d'observation de la Terre et de leurs dérivés pour estimer les DEC à une échelle fine et pour cartographier les risques sur de longues périodes et sur de vastes zones géographiques génère une quantité considérable de données. Les méthodes et technologies classiques utilisées pour le traitement, l'analyse, le stockage et la gestion de données aussi volumineuses sont actuellement limitées.

Le **tableau 3** résume ces limites et d'autres limitations associées à l'utilisation des images d'observation de la Terre et de leurs dérivés.

Discussion

Le changement climatique favorise l'émergence et la réémergence des maladies transmises par les tiques et les moustiques au Canada. L'utilisation de DEC dérivés des images d'observation de la Terre permet de cartographier l'expansion géographique de ces vecteurs et d'évaluer les risques de maladies qu'ils transmettent. À l'heure actuelle, les images d'observation de la Terre peuvent couvrir toutes les régions urbaines, rurales et éloignées du Canada de façon standardisée et sur une base régulière, à des résolutions spatiales et temporelles variées. Cependant, la précision des dérivés d'images d'observation de la Terre est souvent inconnue.

La précision d'une cartographie du risque dépend largement de la qualité des données utilisées pour modéliser le risque et produire la carte de risque. Nous travaillons actuellement à améliorer la qualité des dérivés des images d'observation de la Terre. Par exemple, des images d'observation de la Terre ayant différentes caractéristiques (y compris la résolution spatiale et les bandes spectrales) peuvent être combinées par fusion d'images ou par réduction d'échelle spatiale pour produire des dérivés d'images d'observation de la Terre à valeur ajoutée qui peuvent répondre aux critères de qualité requis pour estimer les DEC. Ainsi, si on combine des images de température de surface des terres (TST) du capteur thermique infrarouge de Landsat-8 (100 m, 16 jours) avec des images TST du spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) (1000 m, 5 minutes), on peut obtenir une moyenne sur 8 jours des images LST avec une résolution spatiale de 100 m (78). Grâce à des combinaisons de données multicapteurs ou multiproduits, les possibilités d'estimation des DEC et d'évaluation et de cartographie des risques de maladies infectieuses liées au climat dans un contexte de changement environnemental rapide et de variabilité climatique accrue sont pratiquement infinies. De plus, le traitement et l'analyse des données massives dérivées de la combinaison de données provenant de plusieurs satellites nécessitent l'application de méthodes d'intelligence artificielle. Ce faisant, il serait possible de créer une structure opérationnelle éclairée par l'observation de la Terre pour l'évaluation et la cartographie rapides des risques (EO-OFRAM : Earth Observation-Informed Operational Framework for Rapid Risk Assessment and Mapping) des maladies infectieuses liées au climat. Une telle plateforme serait entièrement automatisée et dotée d'une interface utilisateur facile à utiliser qui intégrerait des données de surveillance et d'autres données contextuelles. Elle pourrait servir à répondre à des questions, visualiser les réponses sur des cartes et produire des rapports de situation afin d'éclairer la prise de décision sur les interventions en santé publique.

Les auteurs et leurs partenaires universitaires et gouvernementaux travaillent actuellement à l'élaboration d'indicateurs microclimatiques améliorés, d'indicateurs de microhabitat des vecteurs et d'un système d'intégration et

**Tableau 3 : Limites des images d'observation de la Terre et de leurs dérivés**

Limite	Description
Résolution spatiale grossière	La résolution spatiale correspond à la taille du plus petit détail que l'on peut observer sur l'image. Une résolution spatiale inférieure à 30 m est généralement recommandée pour les applications cartographiques à une échelle locale. Les images d'observation de la Terre et leurs dérivés se rapportant aux déterminants climatiques et microclimatiques ont généralement une résolution spatiale grossière (plus de 1000 m).
Faible résolution temporelle	La résolution temporelle correspond à la fréquence temporelle à laquelle un satellite acquiert des images d'observation de la Terre pour une même région. Une résolution temporelle bimensuelle (16 jours) convient aux images d'observation de la Terre utilisées pour estimer les déterminants environnementaux de la couverture terrestre. Pour estimer les déterminants microclimatiques, une résolution temporelle pouvant servir à établir des moyennes quotidiennes est plus indiquée. Cependant, les images d'observation de la Terre en accès libre à haute résolution spatiale (p. ex. les images Landsat-8), couramment utilisées, n'ont pas cette résolution temporelle.
Précision inconnue ou faible	Les projections relatives au changement climatique indiquent des augmentations de température de 1 °C à plus de 5 °C dans les latitudes élevées, à partir des années 1950 (76,77). Une incertitude inférieure à 1 °C serait appropriée pour les images d'observation de la Terre et leurs dérivés liés à la température. Les métadonnées de nombreux dérivés d'images d'observation de la Terre n'indiquent pas leur précision, alors que cette précision peut être très variable et n'est en général pas disponible.
Composition des classes de couverture du sol incomplètes	Un dérivé d'image d'observation de la Terre relatif aux déterminants environnementaux doit contenir toutes les classes de couverture du sol qui constituent des déterminants environnementaux d'intérêt. Cependant, la composition des classes de couverture du sol d'un dérivé d'image d'observation de la Terre dépend de son producteur et de l'objectif de sa création. De plus, il n'existe pas de dérivé d'image d'observation de la Terre spécialement conçu pour estimer tous les DEC de chaque maladie infectieuse liée au climat.
Échelle d'agrégation temporelle inadéquate	L'échelle d'agrégation temporelle est le pas temporel utilisé pour agréger les données multitemporelles. Les échelles d'agrégation les plus souvent utilisées pour les dérivés des images d'observation de la Terre sont des moyennes quotidiennes, hebdomadaires, mensuelles et annuelles. L'échelle d'agrégation temporelle adéquate dépend des vecteurs de la maladie. Le cycle de vie des vecteurs de maladies transmises par les moustiques est très court (de quelques jours à quelques mois) si on le compare à celui des vecteurs de maladies transmises par les tiques (plusieurs années). Une échelle hebdomadaire est plus adéquate dans le premier cas et une échelle annuelle dans le second. Toutefois, pour certains DEC, il n'existe pas de dérivés d'images d'observation de la Terre conçus avec les échelles d'agrégation temporelle recherchées (par exemple, les accumulations annuelles des degrés-jours de surface, dérivées des images des températures de surface).
Mises à jour très espacées	Une fréquence de mise à jour annuelle est généralement adéquate pour les dérivés d'images d'observation de la Terre utilisés pour estimer les déterminants environnementaux. Toutefois, plusieurs de ces produits ne sont pas mis à jour annuellement.
Courte période d'archivage	Une période d'archivage relativement longue (plus de 15 ou 30 ans) peut être nécessaire pour étudier l'évolution des risques de maladies infectieuses dans le contexte du changement climatique. Cependant, la période d'archivage de plusieurs images d'observation de la Terre et de leurs dérivés n'est pas assez longue pour étudier l'impact du changement climatique sur les maladies infectieuses.
Couverture géographique incomplète	L'évaluation et la cartographie des risques de maladies infectieuses aux frontières nécessitent souvent des données couvrant plusieurs régions administratives différentes (p. ex. Québec/Ontario; Canada/États-Unis).
Méthodes et outils traditionnels non adaptés aux données massives des images d'observation de la Terre	Un ensemble de données d'images d'observation de la Terre couvrant un vaste pays comme le Canada, avec une résolution spatiale élevée, une résolution temporelle élevée, des mises à jour fréquentes et une longue période d'archivage, produira des données massives pour lesquelles les méthodes et outils traditionnels de traitement et de gestion des données d'observation de la Terre ne sont pas appropriés.

Abréviations : DEC, déterminants environnementaux et climatiques

de fusion des données. Ces outils novateurs amélioreront la précision de l'estimation des DEC et appuieront l'évaluation et la cartographie dynamiques et multi-échelles des risques des maladies infectieuses liées au climat par le biais de l'EO-OFRAM. Dans le cadre du Programme Solutions innovatrices Canada, l'Agence de la santé publique du Canada a lancé un défi à l'industrie concernant le traitement et l'analyse des données massives (79). Un meilleur traitement et une meilleure analyse des données massives, notamment par l'application de techniques novatrices d'apprentissage automatique (un sous-ensemble de l'intelligence artificielle), permettront de mieux exploiter le grand volume de données que produisent les images d'observation de la Terre. L'utilisation d'un EO-OFRAM basé sur l'intelligence artificielle en santé publique dépendra de son efficacité à évaluer les risques dans différents environnements et à différents niveaux de décision (local, provincial/territorial et national). La création d'un EO-OFRAM

visé à équiper et optimiser les activités de suivi, de contrôle et de prévention à ces trois niveaux de gouvernance. Les principaux défis d'une telle initiative sont le financement, la participation des intervenants en santé publique des différents paliers de gouvernement et l'élaboration de normes communes.

Conclusion

Les risques de maladies infectieuses émergentes liées au climat varient considérablement d'une région géographique à l'autre et dans le temps. Les images d'observation de la Terre et leurs dérivés offrent de nombreux avantages pour caractériser cette hétérogénéité par l'estimation des déterminants environnementaux et climatiques, et la cartographie des risques associés à ces maladies. Grâce à l'élaboration et à l'application d'approches améliorées pour traiter et analyser les données volumineuses dérivées des images d'observation de la Terre, notamment l'apprentissage automatique, ainsi que



l'élaboration d'indicateurs pour les microhabitats des vecteurs et les microclimats, ces images offrent certains outils novateurs pour améliorer notre capacité à modéliser et à cartographier le risque, et ainsi appuyer encore mieux les interventions en santé publique contre les maladies à vecteur.

Déclaration des auteurs

SOK — Conceptualisation, enquête, rédaction de l'ébauche originale, révision et modifications

CB — Rédaction de l'ébauche originale, révision et modifications

AL — Rédaction de l'ébauche originale, révision et modifications

ER — Rédaction de l'ébauche originale, révision et modifications

SB — Rédaction de l'ébauche originale, révision et modifications

Références

- Luber G, Prudent N. Climate change and human health. *Trans Am Clin Climatol Assoc* 2009;120:113–7. [PubMed](#)
- Prudent N, Houghton A, Luber G. Assessing climate change and health vulnerability at the local level: travis County, Texas. *Disasters* 2016 Oct;40(4):740–52. [DOI PubMed](#)
- Warren FJ, Lemmen DS, editors. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada; 2014. 286 p. www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2014/pdf/Rapport-complet_Fra.pdf
- Du X, Shrestha NK, Wang J. Assessing climate change impacts on stream temperature in the Athabasca River Basin using SWAT equilibrium temperature model and its potential impacts on stream ecosystem. *Sci Total Environ* 2019 Feb;650(Pt 2):1872–81. [DOI PubMed](#)
- Statistique Canada. *L'activité humaine et l'environnement, 2007 et 2008. Section 1 : Changements climatiques au Canada*. Ottawa (ON) : StatCan. (Accédé 2019-02-25). <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/16-201-x/2007000/10542-fra.htm>
- Lemmen DS, Warren FJ, Lacroix J, Bush E, editors. *Vivre avec les changements climatiques au Canada 2008*. Ottawa (ON): Gouvernement du Canada. 448 p. (Accédé 2019-02 25). <https://www.rncan.gc.ca/environnement/ressources/publications/impacts-adaptation/rapports/evaluations/2008/10254>
- Ogden NH. Maladies à transmission vectorielle, changement climatique et conception urbaine. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2016;42:225–6. [DOI](#)
- Zhang L, Zhao Y, Hein-Griggs D, Barr L, Ciborowski JJ. Projected extreme temperature and precipitation of the Laurentian Great Lakes Basin. *Global Planet Change* 2019;172:325–35. [DOI](#)
- Zhang L, Zhao Y, Hein-Griggs D, Ciborowski JJ. Projected monthly temperature changes of the Great Lakes Basin. *Environ Res* 2018 Nov;167:453–67. [DOI PubMed](#)
- Waits A, Emelyanova A, Oksanen A, Abass K, Rautio A. Human infectious diseases and the changing climate in the Arctic. *Environ Int* 2018 Dec;121(Pt 1):703–13. [DOI PubMed](#)
- Mathieu K, Karmali M. Maladies à transmission vectorielle, changements climatiques et modes de vie sains en milieu urbain : prochaines étapes. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2016;42:243–5. [DOI](#)
- Simon JA, Marrotte RR, Desrosiers N, Fiset J, Gaitan J, Gonzalez A, Koffi JK, Lapointe FJ, Leighton PA, Lindsay LR, Logan T, Milord F, Ogden NH, Rogic A, Roy-Dufresne E, Suter D, Tessier N, Millien V. Climate change and habitat fragmentation drive the occurrence of *Borrelia burgdorferi*, the agent of Lyme disease, at the northeastern limit of its distribution. *Evol Appl* 2014 Aug;7(7):750–64. [DOI PubMed](#)
- Brownstein JS, Skelly DK, Holford TR, Fish D. Forest fragmentation predicts local scale heterogeneity of Lyme disease risk. *Oecologia* 2005 Dec;146(3):469–75. [DOI PubMed](#)
- Ogden NH, Bigras-Poulin M, O'Callaghan CJ, Barker IK, Lindsay LR, Maarouf A, Smoyer-Tomic KE, Waltner-Toews D, Charron D. A dynamic population model to investigate effects of climate on geographic range and seasonality of the tick *Ixodes scapularis*. *Int J Parasitol* 2005 Apr;35(4):375–89. [DOI PubMed](#)
- Clow KM, Leighton PA, Ogden NH, Lindsay LR, Michel P, Pearl DL, Jardine CM. Northward range expansion of *Ixodes scapularis* evident over a short timescale in Ontario, Canada. *PLoS One* 2017 Dec;12(12):e0189393. [DOI PubMed](#)
- Bouchard C, Beauchamp G, Nguon S, Trudel L, Milord F, Lindsay LR, Bélanger D, Ogden NH. Associations between *Ixodes scapularis* ticks and small mammal hosts in a newly endemic zone in southeastern Canada: implications for *Borrelia burgdorferi* transmission. *Ticks Tick Borne Dis* 2011 Dec;2(4):183–90. [DOI PubMed](#)
- Kotchi SO, Brazeau S, Ludwig A, Aube G, Berthiaume P. Earth Observation and Indicators Pertaining to Determinants of Health – An Approach to Support Local Scale Characterization of Environmental Determinants of Vector-Borne Diseases. In: Ouwehand L, editor. *Proceedings of Living Planet Symposium 2016*; 2016 May 9–13; Prague,

Conflit d'intérêts

Aucun.

Financement

Ce travail a été réalisé grâce au soutien de l'Agence de la santé publique du Canada et de l'Agence spatiale canadienne.



- Czech Republic. Noordwijk (The Netherlands): ESA Communications; 2016. <http://lps16.esa.int/>
18. Karmali M, Weinstock D. Présentation de compte-rendu d'ateliers sur des maladies à transmission vectorielle émergentes et les milieux urbains. Relevé des maladies transmissibles au Canada 2016;42:220. DOI
 19. Kulkarni MA. Propagation et répercussions des maladies à transmission vectorielle émergentes à l'échelle mondiale. Relevé des maladies transmissibles au Canada 2016;42:221-2. DOI PubMed
 20. Berrang-Ford L, Harper SL, Eckhardt R. Maladies à transmission vectorielle : mettre fin au débat entre déterminants climatiques et déterminants sociaux. Relevé des maladies transmissibles au Canada 2016;42:235-6. DOI
 21. Savić S, Vidić B, Grgić Z, Potkonjak A, Spasojević L. Emerging Vector-Borne Diseases - incidence through vectors. Front Public Health 2014 Dec;2:267. DOI PubMed
 22. Brazeau S, Kotchi SO, Ludwing A, Turgeon P, Petcat Y, Aube G, Ogden NH. Tele-Epidemiology and Public Health in the Canadian Context. In: Ouweland L, editor. Proceedings of Living Planet Symposium 2016; 2016 May 9–13; Prague, Czech Republic. Noordwijk (The Netherlands): ESA Communications; 2016. <http://lps16.esa.int/>
 23. Gouvernement du Canada. 2019. Surveillance de la maladie de Lyme. Ottawa (ON) : ASPC. (Accédé 2019-02-26) <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/maladie-lyme/surveillance-maladie-lyme.html>
 24. Ogden NH, Koffi JK, Lindsay LR, Fleming S, Mombourquette DC, Sanford C, Badcock J, Gad RR, Jain-Sheehan N, Moore S, Russell C, Hobbs L, Baydack R, Graham-Derham S, Lachance L, Simmonds K, Scott AN. Surveillance de la maladie de Lyme au Canada, de 2009 à 2012. Relevé des maladies transmissibles au Canada 2015;41(6):152–68. DOI
 25. Gasmi S, Ogden NH, Lindsay LR, Burns S, Fleming S, Badcock J, Hanan S, Gaulin C, Leblanc MA, Russell C, Nelder M, Hobbs L, Graham-Derham S, Lachance L, Scott AN, Galanis E, Koffi JK. Surveillance de la maladie de Lyme au Canada, de 2009 à 2015. Relevé des maladies transmissibles au Canada 2017;43(10):219-25. DOI
 26. Chen CC, Jenkins E, Epp T, Waldner C, Curry PS, Soos C. Climate change and West Nile virus in a highly endemic region of North America. Int J Environ Res Public Health 2013 Jul;10(7):3052–71. DOI PubMed
 27. Ludwig A, Zheng H, Vrbova L, Drebot MA, Iranpour M, Lindsay LR. Augmentation du risque de maladies endémiques transmises par des moustiques au Canada en raison du changement climatique. Relevé des maladies transmissibles au Canada 2019;45(4):99–107. DOI
 28. Armstrong PM, Andreadis TG, Shepard JJ, Thomas MC. Northern range expansion of the Asian tiger mosquito (*Aedes albopictus*): analysis of mosquito data from Connecticut, USA. PLoS Negl Trop Dis 2017 May;11(5):e0005623 eCollection 2017. DOI PubMed
 29. Bouchard C, Dibbernardo A, Koffi J, Wood H, Leighton PA, Lindsay LR. Augmentation du risque de maladies transmises par des tiques en raison des changements climatiques et environnementaux. Relevé des maladies transmissibles au Canada 2019;45(4):89–98. DOI
 30. Sonenshine DE. Range Expansion of Tick Disease Vectors in North America: Implications for Spread of Tick-Borne Disease. Int J Environ Res Public Health 2018 Mar;15(3):E478. DOI PubMed
 31. Hongoh V, Berrang-Ford L, Scott ME, Lindsay LR. Expanding geographical distribution of the mosquito, *Culex pipiens*, in Canada under climate change. Appl Geogr 2012;33(1):53–62. DOI
 32. Group on Earth Observations (GEO). What is Earth observation? (Accessed February 2019). https://www.earthobservations.org/g_faq.html
 33. Clements AC, Reid HL, Kelly GC, Hay SI. Further shrinking the malaria map: how can geospatial science help to achieve malaria elimination? Lancet Infect Dis 2013 Aug;13(8):709–18. DOI PubMed
 34. Hay SI, Snow RW. The malaria Atlas Project: developing global maps of malaria risk. PLoS Med 2006 Dec;3(12):e473. DOI PubMed
 35. Merkord CL, Liu Y, Mihretie A, Gebrehiwot T, Awoke W, Bayabil E, Henebry GM, Kassa GT, Lake M, Wimberly MC. Integrating malaria surveillance with climate data for outbreak detection and forecasting: the EPIDEMIA system. Malar J 2017 Feb;16(1):89. DOI PubMed
 36. Thomson MC, Connor SJ, Milligan P, Flasse SP. Mapping malaria risk in Africa: what can satellite data contribute? Parasitol Today 1997 Aug;13(8):313–8. DOI PubMed
 37. Gemperli A, Sogoba N, Fondjo E, Mabaso M, Bagayoko M, Briët OJ, Anderegg D, Liebe J, Smith T, Vounatsou P. Mapping malaria transmission in West and Central Africa. Trop Med Int Health 2006 Jul;11(7):1032–46. DOI PubMed
 38. Beck LR, Lobitz BM, Wood BL. Remote sensing and human health: new sensors and new opportunities. Emerg Infect Dis 2000 May-Jun;6(3):217–27. DOI PubMed
 39. Clements AC, Reid HL, Kelly GC, Hay SI. Further shrinking the malaria map: how can geospatial science help to achieve malaria elimination? Lancet Infect Dis 2013 Aug;13(8):709–18. DOI PubMed
 40. Correia VR, Carvalho MS, Sabroza PC, Vasconcelos CH. Remote sensing as a tool to survey endemic diseases in Brazil. Cad Saude Publica 2004 Jul-Aug;20(4):891–904. DOI PubMed
 41. Agence spatiale canadienne (ASC). Satellites d'observation de la Terre. ASC, Canada. (Accédé janvier 2019). <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/default-ot.asp>
 42. National Aeronautics and Space Administration (NASA). AIRS Instrument Specs. NASA, United States of America (Accessed January 2019). https://airs.jpl.nasa.gov/mission_and_instrument/instrument/specs
 43. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Precipitation measurement missions. United States of America (Accessed January 2019). <https://pmm.nasa.gov/precipitation-measurement-missions>
 44. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Remote Sensors. NASA, United States of America (Accessed



- January 2019). <https://earthdata.nasa.gov/user-resources/remote-sensors>
45. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). NASA, United States of America (Accessed January 2019). <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/viirs/>
 46. Remote Sensing Systems (RSS). Research-quality geophysical products from satellite microwave sensors. RSS, United States of America (Accessed January 2019). <http://www.remss.com/>
 47. Satellite Imaging Corporation (SIC). Satellite Sensors. SIC, United States of America (Accessed January 2019). <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/>
 48. World Meteorological Organization (WMO). Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR). Switzerland: WMO; 2011-2019 (Accessed January 2019). <https://www.wmo-sat.info/oscar/>
 49. Manore CA, Davis J, Christofferson RC, Wesson D, Hyman JM, Mores CN. Towards an early warning system for forecasting human west nile virus incidence. *PLoS Curr* 2014 Mar;6. [DOI PubMed](#)
 50. Tran A, Sudre B, Paz S, Rossi M, Desbrosse A, Chevalier V, Semenza JC. Environmental predictors of West Nile fever risk in Europe. *Int J Health Geogr* 2014 Jul;13:26. [DOI PubMed](#)
 51. Brown L, Medlock J, Murray V. Impact of drought on vector-borne diseases—how does one manage the risk? *Public Health* 2014 Jan;128(1):29–37. [DOI PubMed](#)
 52. Rosà R, Marini G, Bolzoni L, Neteler M, Metz M, Delucchi L, Chadwick EA, Balbo L, Mosca A, Giacobini M, Bertolotti L, Rizzoli A. Early warning of West Nile virus mosquito vector: climate and land use models successfully explain phenology and abundance of *Culex pipiens* mosquitoes in north-western Italy. *Parasit Vectors* 2014 Jun;7:269. [DOI PubMed](#)
 53. Gardner AM, Lampman RL, Muturi EJ. Land use patterns and the risk of West Nile virus transmission in central Illinois. *Vector Borne Zoonotic Dis* 2014 May;14(5):338–45. [DOI PubMed](#)
 54. Rees EE, Petukhova T, Mascarenhas M, Pelcat Y, Ogden NH. Environmental and social determinants of population vulnerability to Zika virus emergence at the local scale. *Parasit Vectors* 2018 May;11(1):290. [DOI PubMed](#)
 55. Barbour AG. Fall and rise of Lyme disease and other Ixodes tick-borne infections in North America and Europe. *Br Med Bull* 1998;54(3):647–58. [DOI PubMed](#)
 56. Kilpatrick AM, Dobson AD, Levi T, Salkeld DJ, Swei A, Ginsberg HS, Kjemtrup A, Padgett KA, Jensen PM, Fish D, Ogden NH, Diuk-Wasser MA. Lyme disease ecology in a changing world: consensus, uncertainty and critical gaps for improving control. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2017 Jun;372(1722):20160117. [DOI PubMed](#)
 57. Gabriele-Rivet V, Koffi JK, Pelcat Y, Arsenaault J, Cheng A, Lindsay LR, Lysyk TJ, Rochon K, Ogden NH. A Risk Model for the Lyme Disease Vector *Ixodes scapularis* (Acari: Ixodidae) in the Prairie Provinces of Canada. *J Med Entomol* 2017 Jul;54(4):862–8. [DOI PubMed](#)
 58. Bouchard C, Beauchamp G, Leighton PA, Lindsay R, Bélanger D, Ogden NH. Does high biodiversity reduce the risk of Lyme disease invasion? *Parasit Vectors* 2013 Jul;6:195. [DOI PubMed](#)
 59. Cuber P, Andreassen Å, Vainio K, Asman M, Dudman S, Szilman P, Ottesen P, Ånestad G, Cieřła-Nobis S, Solarz K. Risk of exposure to ticks (Ixodidae) and the prevalence of tick-borne encephalitis virus (TBEV) in ticks in Southern Poland. *Ticks Tick Borne Dis* 2015 Apr;6(3):356–63. [DOI PubMed](#)
 60. Dantas-Torres F. Climate change, biodiversity, ticks and tick-borne diseases: the butterfly effect. *Int J Parasitol Parasites Wildl* 2015 Aug;4(3):452–61. [DOI PubMed](#)
 61. Estrada-Peña A, de la Fuente J. The ecology of ticks and epidemiology of tick-borne viral diseases. *Antiviral Res* 2014 Aug;108:104–28. [DOI PubMed](#)
 62. Werden L, Barker IK, Bowman J, Gonzales EK, Leighton PA, Lindsay LR, Jardine CM. Geography, deer, and host biodiversity shape the pattern of Lyme disease emergence in the Thousand Islands Archipelago of Ontario, Canada. *PLoS One* 2014 Jan;9(1):e85640. [DOI PubMed](#)
 63. Ripoche M, Lindsay LR, Ludwig A, Ogden NH, Thivierge K, Leighton PA. Multi-Scale Clustering of Lyme Disease Risk at the Expanding Leading Edge of the Range of *Ixodes scapularis* in Canada. *Int J Environ Res Public Health* 2018 Mar;15(4):603. [DOI PubMed](#)
 64. Batallán GP, Estallo EL, Flores FS, Sartor P, Contigiani MS, Almirón WR. St. Louis Encephalitis virus mosquito vectors dynamics in three different environments in relation to remotely sensed environmental conditions. *Acta Trop* 2015 Jun;146:53–9. [DOI PubMed](#)
 65. Bowden SE, Magori K, Drake JM. Regional differences in the association between land cover and West Nile virus disease incidence in humans in the United States. *Am J Trop Med Hyg* 2011 Feb;84(2):234–8. [DOI PubMed](#)
 66. Chuang TW, Henebry GM, Kimball JS, Vanroekel-Patton DL, Hildreth MB, Wimberly MC. Satellite microwave remote sensing for environmental modeling of mosquito population dynamics. *Remote Sens Environ* 2012 Oct;125:147–56. [DOI PubMed](#)
 67. DeGroot JP, Sugumaran R, Brend SM, Tucker BJ, Bartholomay LC. Landscape, demographic, entomological, and climatic associations with human disease incidence of West Nile virus in the state of Iowa, USA. *Int J Health Geogr* 2008 May;7:19. [DOI PubMed](#)
 68. Liu H, Weng Q. Enhancing temporal resolution of satellite imagery for public health studies: A case study of West Nile Virus outbreak in Los Angeles in 2007. *Remote Sens Environ* 2012;117:57–71. [DOI](#)
 69. vonHedemann N, Butterworth MK, Robbins P, Morin CW, Landau K. Visualizations of mosquito risk: A political ecology approach to understanding the territorialization of hazard control. *Landscape Urban Plan.* 2015;142:159-69. [DOI](#)



70. Kotchi SO, Turgeon P, Michel P, Lavigne MP, Brazeau S. Assessing and Monitoring Microbiological Quality of Surface Waters Using Tele-Epidemiology. *Glob Bioet* 2011;24(1-4):65–70. DOI
71. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). Space Solutions for the World's Problems: How the United Nations family uses space technology for achieving development goals. Vienna (Austria): UNOOSA; 2005. http://www.unoosa.org/oosa/oosadoc/data/documents/2005/stspace/stspace200501_0.html
72. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures. UNOOSA, Austria (Accédé janvier 2018). <http://www.un-spider.org/fr/applications-spatiales/mecanismes-durgences/charte-internationale-espace-et-catastrophes-majeures>
73. Asrar FM, Asrar S, Clark JB, Kendall DJ, Ngo-Anh TJ, Brazeau S, Hulsroj P, Williams RS. Help from above: outer space and the fight against Ebola. *Lancet Infect Dis* 2015 Aug;15(8):873–5. DOI PubMed
74. Yang C, Luo J, Hu C, Tian L, Li J, Wang K. An Observation Task Chain Representation Model for Disaster Process-Oriented Remote Sensing Satellite Sensor Planning: A Flood Water Monitoring Application. *Remote Sens* 2018;10(3):375. DOI
75. Hamm NA, Soares Magalhães RJ, Clements AC. Earth Observation, Spatial Data Quality, and Neglected Tropical Diseases. *PLoS Negl Trop Dis* 2015 Dec;9(12):e0004164. DOI PubMed
76. Johnson DP, Wilson JS, Luber GC. Socioeconomic indicators of heat-related health risk supplemented with remotely sensed data. *Int J Health Geogr* 2009 Oct;8:57. DOI PubMed
77. Luber G, McGeehin M. Climate change and extreme heat events. *Am J Prev Med* 2008 Nov;35(5):429–35. DOI PubMed
78. Hazaymeh K, Hassan QK. Fusion of MODIS and landsat-8 surface temperature images: a new approach. *PLoS One* 2015 Mar;10(3):e0117755. DOI PubMed
79. Gouvernement du Canada. Innovation, Sciences et Développement économique Canada. Système de traitement et gestion des images d'observation de la Terre. ISDE. (Accédé décembre 2018). <http://www.ic.gc.ca/eic/site/101.nsf/fra/00029.html>



L'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques

G Germain^{1*}, A Simon², J Arsenault², G Baron³, C Bouchard⁴, D Chaumont⁵, F El Allaki⁶, A Kimpton¹, B Lévesque⁷, A Massé⁸, M Mercier⁹, NH Ogden⁴, I Picard¹⁰, A Ravel², JP Rocheleau² et J Soto¹ pour l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques

Résumé

Les changements climatiques sont associés à un établissement et à une expansion géographique des zoonoses. L'augmentation des cas humains de maladie de Lyme au Québec (Canada) représente un exemple bien documenté. Avec la hausse des températures observée au Québec, on s'attend à ce que plusieurs zoonoses soient touchées. Afin de répondre aux enjeux zoonotiques croissants auxquels font face les autorités de la santé publique, l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques (l'Observatoire) a été fondé en 2015 comme partie intégrante du *Plan d'action 2013–2020 sur les changements climatiques* du gouvernement du Québec. L'Observatoire a été créé dans le but de regrouper des décideurs de politiques publiques et des experts en santé humaine et animale ainsi qu'en sciences de l'environnement selon l'approche novatrice « Un monde, une santé ». Cet observatoire offre un espace de partage de connaissances et de recherche de consensus entre les représentants de décideurs de politiques publiques et les scientifiques. Ses objectifs principaux sont d'anticiper et de prioriser les enjeux potentiels associés aux zoonoses au Québec afin de soutenir la gestion des risques et l'adaptation aux changements climatiques. Le présent article décrit la structure de l'Observatoire, ce qu'il fait et résume ses plans pour l'avenir.

Citation suggérée : Germain G, Simon A, Arsenault J, Baron G, Bouchard C, Chaumont D, El Allaki F, Kimpton A, Lévesque B, Massé A, Mercier M, Ogden NH, Picard I, Ravel A, Rocheleau JP, Soto J. Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques. *Relevé des maladies transmissibles au Canada* 2019;45(5):159-64. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v45i05a05f>

Mots-clés : adaptation, changement climatique, Observatoire, Un monde, une santé, zoonoses, priorisation, anticipation

Introduction

Selon l'Organisation mondiale de la santé, les changements climatiques constituent la menace la plus importante à la santé humaine au 21^e siècle (1). Cette menace a été associée à l'augmentation des maladies chroniques, aux problèmes de santé liés aux canicules et aux inondations extrêmes, aux pénuries de nourriture causées par la sécheresse ou les inondations, aux problèmes respiratoires associés à la présence de smog ou de pollen ainsi qu'à une augmentation possible des maladies associées à l'exposition au rayonnement ultraviolet (2). Il a aussi été démontré que les changements climatiques jouent un rôle dans l'établissement et

l'expansion géographique des zoonoses. Ces dernières sont définies comme des maladies ou des infections causées par des virus, des bactéries, des parasites, des champignons ou des prions et elles peuvent se transmettre entre les humains et les animaux (3). Les zoonoses représentent 60 % des maladies infectieuses émergentes et leur importance en termes de santé globale est en augmentation constante (4).

Les changements climatiques entraînent une augmentation de la température et des précipitations, lesquelles influencent la survie et la propagation des agents pathogènes

Affiliations

¹ Direction des risques biologiques et de la santé au travail, Institut national de santé publique du Québec, Montréal (Québec)

² Groupe de recherche en épidémiologie des zoonoses et en santé publique, Faculté de médecine vétérinaire, Université de Montréal, Saint-Hyacinthe (Québec)

³ Direction de la santé publique, Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de l'Estrie-Centre hospitalier universitaire de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec)

⁴ Laboratoire national de microbiologie, Agence de la santé publique du Canada, Saint-Hyacinthe (Québec)

⁵ Scénarios et services climatiques, Ouranos, Montréal (Québec)

⁶ Section d'épidémiologie et de surveillance de la santé des animaux terrestres, Direction des sciences de la santé des animaux, Agence canadienne d'inspection des aliments, Saint-Hyacinthe (Québec)

⁷ Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique du Québec, Québec (Québec)

⁸ Direction de l'expertise sur la faune terrestre, l'herpétofaune et l'avifaune, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Québec (Québec)

⁹ Direction de la vigie sanitaire, Ministère de la Santé et des Services sociaux, Montréal (Québec)

¹⁰ Direction de la santé animale, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Québec (Québec)

*Correspondance : genevieve.germain@inspq.qc.ca



zoonotiques ou le taux de reproduction et la distribution géographique de leurs vecteurs (5). Les activités qui prolongent la période de transmission des zoonoses, tout comme celles qui augmentent ou prolongent l'exposition humaine aux vecteurs ou à un environnement contaminé par les agents pathogènes zoonotiques, sont également susceptibles d'être affectées par les changements climatiques (5).

Au Québec, la température annuelle moyenne a augmenté entre 1°C et 3°C depuis 1950 et on s'attend à ce qu'elle augmente de 2°C à 4°C additionnels d'ici 2050 (6). La surveillance des zoonoses au Québec a démontré une augmentation des cas humains des maladies zoonotiques, entre autres la maladie de Lyme (7). Le principal vecteur de la maladie de Lyme en Amérique du Nord, la tique *Ixodes scapularis*, a élargi son aire de distribution géographique de 35 à 55 km par année au Canada et cette expansion est principalement associée aux changements climatiques (8). Une expansion du territoire des populations de tiques de l'ensemble du Canada va probablement entraîner une augmentation du nombre de contacts entre les humains et les tiques, et de ce fait, des maladies transmissibles par les tiques (9). Néanmoins, de manière globale, les effets des changements climatiques sur les zoonoses sont mal compris et difficiles à prévoir en raison de la complexité de leur écologie et des différents impacts qu'ils ont sur ces maladies (10).

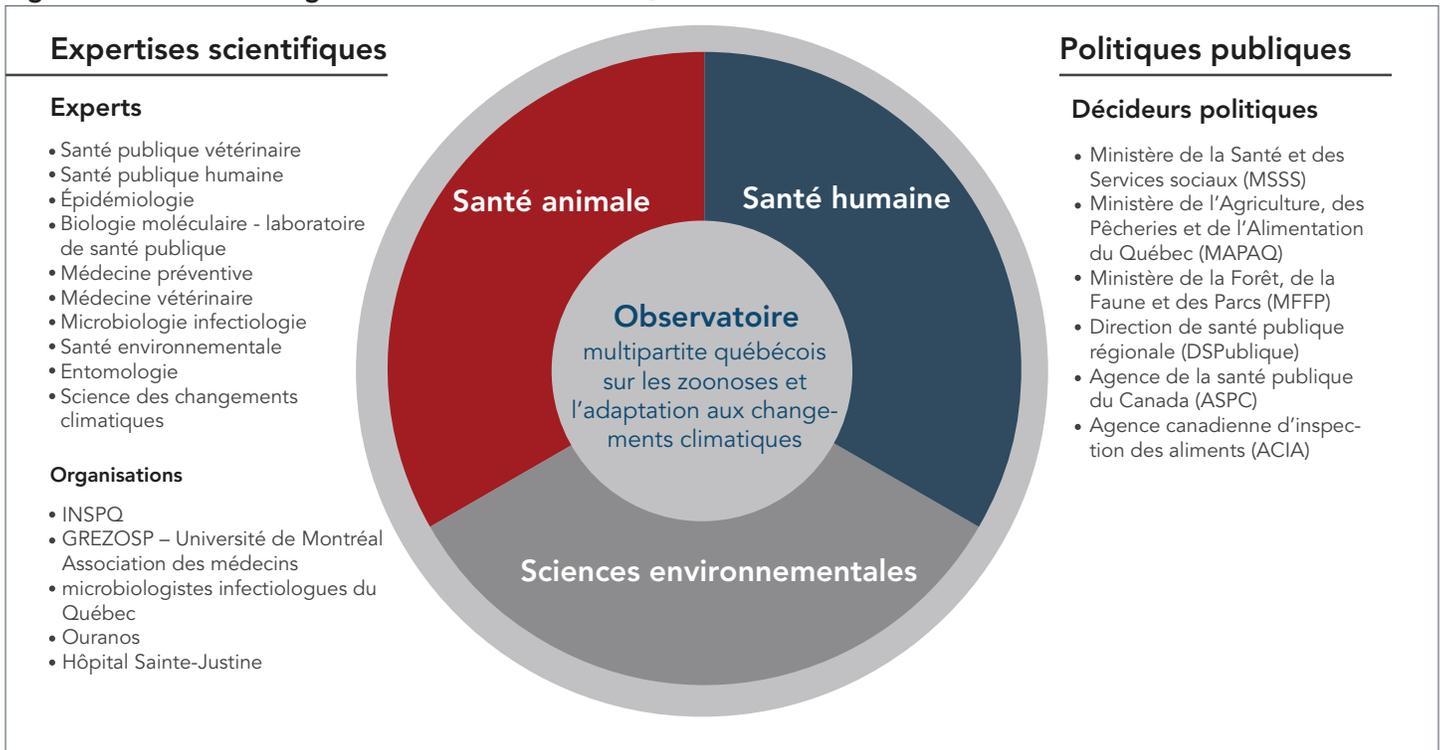
Le but de l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques (l'Observatoire) est

d'évaluer les zoonoses, de surveiller leur évolution, d'informer et de soutenir les décideurs politiques sur la gestion de ces risques, particulièrement en lien avec la façon dont ces zoonoses et les agents pathogènes qui leur sont associées réagissent aux changements climatiques. L'Observatoire a été fondé en 2015 dans le cadre du *Plan d'action 2013–2020 sur les changements climatiques* du gouvernement du Québec, qui a mandaté le ministère de la Santé et des Services sociaux afin qu'il déploie les actions liées à la santé. L'objectif du présent article est de décrire la structure de l'Observatoire, de présenter ses actions et de résumer sa planification future.

La structure de l'Observatoire

L'Observatoire est une structure de collaboration entre des experts scientifiques et des représentants de décideurs de politiques publiques provenant de l'ensemble de la province de Québec (figure 1). Il possède sa propre structure organisationnelle inspirée de l'approche novatrice « Un monde, une santé » (11). Cette approche se définit comme « un effort intégré de plusieurs disciplines travaillant de concert aux niveaux local, national et international afin d'atteindre une santé optimale pour les humains, les animaux et l'environnement » (12). L'Observatoire facilite cette collaboration par des discussions qui permettent de transférer des connaissances entre les membres dans trois domaines d'expertises spécialisés : la santé humaine, la santé animale et les sciences environnementales. Il structure

Figure 1: La structure organisationnelle « Un monde, une santé » de l'Observatoire



Abbréviations: INSPQ, Institut national de santé publique du Québec; GREZOPS, Groupe de recherche en épidémiologie des zoonoses et en santé publique
Légende: Diagramme des trois domaines d'expertise du noyau de l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques et les liens entre les scientifiques experts et les décideurs politiques publiques.



et encourage le réseautage entre les membres au moyen de rencontres régulières et de la production d'un éventail de livrables.

L'Observatoire est géré par la *Direction des risques biologiques et de la santé au travail de l'Institut national de santé publique du Québec* (INSPQ). La coordination scientifique de l'Observatoire est assurée par un partenariat entre l'INSPQ et la Faculté de médecine vétérinaire de l'Université de Montréal, plus spécifiquement par le *Groupe de recherche en épidémiologie des zoonoses et en santé publique* (GREZOSP).

La plupart des membres participent sur une base volontaire dans le cadre de leur emploi. Deux coordonnatrices à temps partiel, qui offrent un soutien opérationnel et qui sont responsables de la mise en œuvre du plan d'action de l'Observatoire, sont rémunérées. Ces coordonnatrices prennent aussi part au comité de pilotage qui valide leurs livrables et leurs décisions opérationnelles. Certains participants qui possèdent également une expertise pertinente sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques contribuent ou sont impliqués de manière ad hoc aux activités de l'Observatoire.

Les actions de l'Observatoire

En lien avec son mandat de faciliter le réseautage entre les scientifiques et les décideurs de politiques publiques qui sont concernés par les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques au Québec, et celui d'évaluer les risques zoonotiques existants et de prévoir les problématiques associées, l'Observatoire :

1. identifie, anticipe et priorise les enjeux liés aux zoonoses et aux changements climatiques
2. surveille l'évolution des zoonoses, particulièrement en effectuant une veille scientifique, incluant les écrits scientifiques, la littérature grise et la veille médiatique, ainsi que les renseignements partagés par les membres
3. soutient les décideurs de politiques publiques dans la gestion des risques reliés aux zoonoses
4. transfère des connaissances afin d'éclairer et d'augmenter le niveau de vigilance en lien avec les zoonoses auprès des membres, des autres experts scientifiques concernés par les zoonoses, ainsi qu'auprès des professionnels de la santé humaine et animale

Prioriser les enjeux associés aux zoonoses

Peu après sa création, la première action de l'Observatoire a été de prioriser les zoonoses et d'identifier les manques de connaissances qui limitent les actions de la santé publique (13). Un rapport basé principalement sur l'opinion des experts membres de l'Observatoire et de ses collaborateurs a été

produit. Le rapport présentait une fiche portant sur chacune des principales zoonoses priorisées par l'Observatoire, présentée selon un format synthétique standardisé, rendant ainsi ces informations plus facilement accessibles. Des recommandations sur les besoins d'activités de surveillance, de prévention et de contrôle des zoonoses priorisées, destinées aux décideurs de politiques publiques, y ont été intégrées (13). Ces recommandations ont été élaborées afin d'évaluer les impacts provinciaux des différentes zoonoses et de guider les décideurs de politiques publiques dans leurs efforts de priorisation et d'adaptation des actions au contexte des changements climatiques. Le rapport de l'Observatoire présente également des manques de connaissances pouvant orienter les chercheurs et les organismes de financement. Une version anglaise du présent rapport sera disponible sous peu.

La deuxième démarche de priorisation, qui a débuté en 2018, a fait appel à une méthode de priorisation des zoonoses rigoureuse, transparente et systématique (14). Cette démarche se basait sur une méthode d'analyse de décision multicritère. Cette méthode est issue de la recherche dans le domaine opérationnel et est utilisée par différentes disciplines afin de hiérarchiser des options sur la base de critères qualitatifs et quantitatifs (15). L'application de cette méthode d'analyse de décision a mené à l'élaboration d'une liste comprenant 32 zoonoses qui ont été classifiées par ordre de priorité en fonction de leurs effets sur la santé des personnes, des animaux et de l'environnement ainsi que de leurs impacts socioéconomiques et de leur potentiel d'émergence ou de transmission en raison des changements climatiques. Le résultat de cette démarche a permis de dégager neuf zoonoses classifiées comme étant « hautement prioritaires ». En ordre décroissant, elles comprennent l'infection au virus du Nil occidental, le botulisme, la rage, la salmonellose, la listériose, l'infection à *Escherichia coli*, le syndrome pulmonaire à Hantavirus, la grippe aviaire et la maladie de Lyme (14). Des fiches portant sur le syndrome pulmonaire à Hantavirus et sur la listériose sont présentement en cours d'élaboration afin d'accompagner le prochain rapport sur les zoonoses priorisées par l'Observatoire (13). Une mise à jour de la priorisation est prévue tous les trois ans.

Veille scientifique

La veille scientifique et tacite des différentes zoonoses au Québec est une autre fonction importante de l'Observatoire. La surveillance scientifique est réalisée en consultant la documentation scientifique, les rapports officiels, la littérature grise et la veille médiatique. La surveillance tacite comprend la collecte de renseignements pertinents sur les enjeux associés aux zoonoses auprès des membres de l'Observatoire. Ces activités sont réalisées en continu et les résultats sont par la suite résumés une fois par année dans le bulletin d'information de l'Observatoire.



Collecter et partager les renseignements

Les enjeux et les besoins en lien avec les zoonoses sont identifiés au cours du processus de priorisation et lors des rencontres de l'Observatoire. Ils sont ensuite communiqués par les membres et les collaborateurs au sein de leurs réseaux et organismes respectifs. De plus, ces enjeux et ces besoins sont diffusés via les publications de l'Observatoire.

Éduquer et sensibiliser

Afin de remplir son mandat de transfert des connaissances, l'Observatoire organise sur une base régulière des webinaires et des conférences portant sur les enjeux des zoonoses émergentes, comme les arbovirus et les zoonoses entériques en émergence au Québec, et leurs associations avec les changements climatiques, ou à des thématiques plus élargies, comme les vulnérabilités aux zoonoses en lien avec l'adaptation aux changements climatiques ou aux approches écosystémiques de la santé. Le travail de l'Observatoire est résumé dans le

Tableau 1.

Discussion

Grâce à sa structure collaborative innovante inspirée de l'approche « Un monde, une santé », l'Observatoire permet de suivre la situation des zoonoses au Québec et d'anticiper les problématiques associées en intégrant des experts issus des secteurs de la santé humaine, de la santé animale et des sciences environnementales. Sa structure multidisciplinaire, qui intègre aussi la participation active d'organismes impliqués dans l'élaboration des politiques publiques, en font un modèle innovateur pour l'ensemble du Canada.

L'élaboration et la mise en œuvre de ce nouveau modèle ne se sont pas réalisées sans heurts. Étant donné le large éventail d'expertises, des difficultés à atteindre un consensus sur les définitions, les objectifs et les recommandations - particulièrement lorsque ces ententes font intervenir des personnes issues de différentes disciplines cumulant moins d'expérience au sein d'une structure multidisciplinaire - se sont manifestées. Par conséquent, les projets initiaux ont pu prendre un certain temps à se réaliser.

Tableau 1: Le mandat, les activités et les actions de l'Observatoire au Québec

Mandat	Activités	Actions	Exemples :
Cibler et anticiper les maladies zoonotiques possibles et les enjeux des changements climatiques	Exercice de priorisation	Identification des zoonoses prioritaires en termes de leurs effets sur la santé, leurs impacts socioéconomiques et leur potentiel d'émergence en raison des changements climatiques Mise en évidence des manques de connaissances et des enjeux associés en lien avec les zoonoses prioritaires	Publications de priorisation www.inspq.qc.ca/publications/2432 www.inspq.qc.ca/publications/2290
Veille scientifique	Surveillance scientifique	Surveillance de la documentation scientifique, incluant les rapports officiels, la littérature grise et la veille médiatique	Bulletin de l'Observatoire : www.inspq.qc.ca/zoonoses/observatoire/bulletin
	Surveillance tacite	Collecte des renseignements tacites et des informations sur les enjeux récents associés aux zoonoses auprès des membres lors des rencontres de l'Observatoire	–
Communiquer les enjeux et les besoins identifiés	Identification des enjeux	Diffusion des compte rendus des rencontres et mise en évidence des enjeux identifiés au sein des organisations des membres	Les compte rendus des rencontres sont transmis aux membres de l'Observatoire et relayés dans leurs réseaux respectifs
	Diffusion des publications	Élaboration d'un plan de communication afin de faire la promotion des publications de l'Observatoire	Les actions du plan de communication comprennent la participation à des conférences ciblées et la promotion sur les pages Web de l'Institut national de santé publique du Québec et du Groupe de recherche en épidémiologie des zoonoses et en santé publique
Élaborer des produits de transfert de connaissances	Webinaires	Organisation et promotion de webinaires portant sur les enjeux zoonotiques en émergence	Dix webinaires ont été organisés, portant sur des sujets comme la maladie de Lyme, les zoonoses entériques, l'Ebola en Afrique de l'Ouest, la surveillance d' <i>Aedes albopictus</i> et des études de modélisation des maladies transmises par les moustiques
	Conférences	Organisation de conférences pour les professionnels en santé publique	Trois journées thématiques faisant partie des Journées annuelles de la santé publique ont été produites (par exemple, la journée thématique de 2018 portait sur les vulnérabilités régionales aux zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques dans les municipalités)



Compte tenu de ses forces et de ses défis, d'importants progrès ont été réalisés et le travail de l'Observatoire se poursuivra. Le prochain projet majeur touchera l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité aux zoonoses. Ce projet se penchera sur le *Guide d'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation* de l'Organisation mondiale de la santé, qui propose une démarche d'évaluation de la vulnérabilité en lien avec l'adaptation aux changements climatiques (16). Par contre, cette méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité n'a pas encore été adaptée aux enjeux zoonotiques au Québec, donc ce projet permettra aux membres de l'Observatoire d'évaluer sa possible application dans le domaine des zoonoses.

Enfin, un processus d'évaluation a été initié au *ministère québécois de la Santé et des Services sociaux* afin d'évaluer la performance et la mise en œuvre de l'Observatoire. L'évaluation déterminera de quelle manière et dans quelle mesure l'Observatoire a rempli son mandat et a eu des impacts à court et moyen termes sur ses membres, ses collaborateurs et son public cible (les experts scientifiques, les experts du milieu académique, les professionnels de la santé publique et les décideurs de politiques publiques). Il évaluera si les membres de l'Observatoire collaborent davantage et dans quelle mesure cette collaboration contribue à une meilleure compréhension des enjeux des zoonoses et de l'impact des changements climatiques. Cette évaluation permettra aux autorités gouvernementales provinciales de réajuster les actions à venir au besoin.

Conclusion

L'Observatoire offre une réponse innovante au besoin de mettre en place des stratégies d'adaptation face à l'augmentation attendue de l'incidence des maladies zoonotiques en lien avec les changements climatiques. L'Observatoire facilite la collaboration entre les membres issus des domaines d'expertises spécialisées en santé humaine, en santé animale et en sciences environnementales notamment par l'entremise d'activités de transfert de connaissances. De plus, en regroupant des experts issus de ces différents domaines et des représentants des organismes impliqués dans l'élaboration de politiques publiques, l'Observatoire aide à prioriser, à surveiller et à évaluer les enjeux des zoonoses associées à l'adaptation aux changements climatiques. Cette veille et ce transfert de connaissances joue un rôle central dans l'accroissement de la capacité du Québec à

faire face à l'évolution de la situation des maladies infectieuses, particulièrement en lien avec changements climatiques.

Déclaration des auteurs

GG – Conceptualisation, rédaction de la première ébauche, examen et révision
 AS – Conceptualisation, rédaction de la première ébauche, examen et révision
 JA — Examen et révision
 GB — Examen et révision
 CB — Examen et révision
 DC — Examen et révision
 FEA — Examen et révision
 AK — Examen et révision
 BL — Examen et révision
 AM — Examen et révision
 MM — Examen et révision
 NHO — Examen et révision
 IP — Examen et révision
 AR — Examen et révision
 JPR — Examen et révision
 JS — Examen et révision

Remerciements

Nous voulons remercier l'ensemble des membres de l'Observatoire pour leur engagement et leur enthousiasme, de même que nos collaborateurs pour leur généreuse contribution à notre travail.

Financement

L'Observatoire s'inscrit dans les actions du *Plan d'action 2013–2020 sur les changements climatiques* du gouvernement du Québec, financé par le Fonds vert. Créé en 2006, le Fonds vert a été institué en vertu de la Loi sur le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (CQLR, chapitre M-30.001) afin de favoriser le développement durable du Québec par la protection de l'environnement, la préservation de la biodiversité et la lutte contre les changements climatiques.





Références

1. Organisation mondiale de la Santé. Appel de l'OMS en faveur d'une intervention d'urgence pour protéger la santé face au changement climatique. (Accédé décembre 2018). www.who.int/globalchange/global-campaign/cop21/fr/
2. Gouvernement du Québec. Effets des changements climatiques sur la santé. (Accédé février 2019). www.quebec.ca/sante/conseils-et-prevention/sante-et-environnement/effets-des-changements-climatiques-sur-la-sante/
3. Lowe AM. Mise sur pied de l'Observatoire. Bulletin de l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques. 2016;1(1):1. www.inspq.qc.ca/bulletin-de-l-observatoire-multipartite-quebecois-sur-les-zoonoses-et-l-adaptation-aux-changements-climatiques/janvier-2016
4. Jones KE, Patel NG, Levy MA, Storeygard A, Balk D, Gittleman JL, Daszak P. Global trends in emerging infectious diseases. *Nature* 2008 Feb;451(7181):990–3. DOI PubMed
5. Belanger D, Berry P, Bouchet V, Charron D, Clarke KL, Doyon B, Fleury M, Furgal C, Gosselin P, Lamy S, Lindsay LR, McBean G, Ogden N, Séguin J, Schuster CJ, Soskolne CL. Santé et changements climatiques : Évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada. Ottawa (ON) : Santé Canada; 2008. http://publications.gc.ca/collections/collection_2008/hc-sc/H128-1-08-528F.pdf
6. Ouranos. Vers l'adaptation : Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec Édition 2015. Montréal (QC) : Ouranos, 2015. www.ouranos.ca/synthese-2015/
7. Institut national de santé publique. Groupe d'experts sur les maladies transmises par les tiques, Ouhoummane N, Irace-Cima A, Thivierge K, Milord F. Rapport de surveillance de la maladie de Lyme : 2017. Montréal (QC) : INSPQ, 2018. www.inspq.qc.ca/publications/2472
8. Leighton PA, Koffi JK, Palcat Y, Lindsay LR, Ogden NH. Predicting the speed of tick invasion: an empirical model of range expansion for the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada. *Journal of Applied Ecology* 2012;49(2):457–64. DOI
9. Ogden NH, Lindsay LR. Effects of Climate and Climate Change on Vectors and Vector-Borne Diseases: Ticks Are Different. *Trends Parasitol* 2016 Aug;32(8):646–56. DOI PubMed
10. Hellberg RS, Chu E. Effects of climate change on the persistence and dispersal of foodborne bacterial pathogens in the outdoor environment: A review. *Crit Rev Microbiol* 2016 Aug;42(4):548–72. DOI PubMed
11. Karesh WB, Cook RA. One world--one health. *Clin Med (Lond)* 2009 Jun;9(3):259–60. DOI PubMed
12. American Veterinary Medical Association. One Health: A New Professional Imperative. One Health Initiative Task Force: Final Report. Schaumburg: American Veterinary Medical Association, 2008. https://www.avma.org/KB/Resources/Reports/Documents/onehealth_final.pdf
13. Institut national de santé publique du Québec et Université de Montréal. Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques. Bouchard C, Lowe AM, Simon A. Portrait des zoonoses priorisées par l'Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques en 2015. Montréal (QC) : INSPQ, 2017. https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2290_portrait_zoonoses_priorisees_2015.pdf
14. Institut national de santé publique du Québec et Université de Montréal. Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques. Simon A, Aenishaenslin C, Hongoh V, Lowe, AM. Priorisation des zoonoses au Québec dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques à l'aide d'un outil d'aide à la décision multicritère. Montréal (QC) : INSPQ, 2018. https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2432_priorisation_zoonoses_quebec_outil_aide_decision_multicritere.pdf
15. Organisation mondiale de la Santé. (2015). Protéger la santé face au changement climatique : évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation. Organisation mondiale de la Santé. <http://www.who.int/iris/handle/10665/151810>
16. Behzadian M, Kazemzadeh RB, Albadvi A, Aghdasi M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research* 2010;200(1):198–215. DOI

RMTC

RELEVÉ DES MALADIES TRANSMISSIBLES AU CANADA

Agence de la santé publique du Canada
130, chemin Colonnade
Indice de l'adresse 6503A
Ottawa (Ontario) K1A 0K9
phac.ccdr-rmtc.aspc@canada.ca

Promouvoir et protéger la santé des Canadiens au moyen du leadership, de partenariats, de l'innovation et de la prise de mesures dans le domaine de la santé publique.

Agence de la santé publique du Canada
Publication autorisée par la ministre de la Santé.

© Cette œuvre est mise à la disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0

On peut aussi consulter cette publication en ligne :
<https://www.canada.ca/rmtc>

Also available in English under the title:
Canada Communicable Disease Report