

INSPQ

INSTITUT NATIONAL
DE SANTÉ PUBLIQUE
DU QUÉBEC

Cartographie de la répartition actuelle et future du virus du Nil occidental au Québec en contexte de changements climatiques

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

JUILLET 2025

RAPPORT MÉTHODOLOGIQUE

AUTRICES

Kirsten Crandall, conseillère scientifique spécialisée
Ariane Adam-Poupart, conseillère scientifique spécialisée
Alejandra Irace-Cima, médecin-conseil
Direction des risques biologiques
Institut national de santé publique du Québec

Diane Chaumont, responsable
Intégration de l'information scientifique pour Portrait Climatiques
Ouranos

Antoinette Ludwig, chercheuse scientifique
Agence de la santé publique du Canada

SOUS LA COORDINATION DE

Ariane Adam-Poupart, coordinatrice professionnelle Zoonoses
Anne Kimpton, chef d'unité scientifique
Direction des risques biologiques

COLLABORATION (liste détaillée à l'annexe 1)

Karl Forest-Bérard, conseiller scientifique
Secrétariat général - Affaires publiques, communication et transfert des connaissances

Bureau d'information et d'études en santé des populations

Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques de l'Institut national de santé publique du Québec

Groupe d'experts sur les maladies transmises par les moustiques de l'Institut national de santé publique du Québec

RÉVISION

Noémie Savard, médecin-conseil
Louise Valiquette, médecin-conseil
Direction des risques biologiques

Les réviseuses ont été conviées à apporter des commentaires sur la version préfinale de ce document et en conséquence, n'en ont pas révisé ni endossé le contenu final.

Les autrices ainsi que les réviseuses ont dûment rempli leurs déclarations d'intérêts et aucune situation à risque de conflits d'intérêts réels, apparents ou potentiels n'a été relevée.

MISE EN PAGE

Linda Cléroux, agente administrative
Direction des risques biologiques

Ce document est disponible intégralement en format électronique (PDF) sur le site Web de l'Institut national de santé publique du Québec au : <http://www.inspq.qc.ca>.

Les reproductions à des fins d'étude privée ou de recherche sont autorisées en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur. Toute autre utilisation doit faire l'objet d'une autorisation du gouvernement du Québec qui détient les droits exclusifs de propriété intellectuelle sur ce document. Cette autorisation peut être obtenue ou en écrivant un courriel à : droits.dauteur.inspq@inspq.qc.ca.

Les données contenues dans le document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.

Dépôt légal – 3^e trimestre 2025
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN : 978-2-555-01582-1 (PDF)

© Gouvernement du Québec (2025)

REMERCIEMENTS

Les autrices remercient les personnes suivantes pour leur collaboration dans l'avancement du projet :

- Geneviève Germain, conseillère scientifique à l'INSPQ, pour son soutien concernant la mise en forme et la diffusion des cartes;
- Pascal Bourgault, spécialiste Plateformes climatiques, données et opérations à Ouranos, pour la préparation et le partage des données climatiques;
- Matthieu Tandonnet, Antoine Saint-Amand et Nathalie Gravel pour leurs conseils, l'intégration des cartes sur le Géoportail et la révision des fiches synthèses.

Les autrices remercient également les personnes et les organisations suivantes pour leur soutien dans le projet, incluant le partage des données de surveillance :

- Christian Therrien, spécialiste clinique en biologie médicale, responsable des arboviroses et des pathogènes zoonotiques au Laboratoire de santé publique du Québec;
- Stéphanie Jodoin, anciennement agente de planification, de programmation et de recherche, ministère de la Santé et des Services sociaux;
- Gabrielle Dimitri-Masson, médecin vétérinaire, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation;
- Stéphane Lair, directeur, Centre québécois pour la santé des animaux sauvages;
- Richard Vadeboncoeur, vice-président au développement des affaires; Jean-François Houde, responsable des laboratoires; Mark Ardis, conseiller scientifique et développement des affaires; et Richard Trudel, conseiller scientifique, GDG Environnement.

Merci à nos partenaires :

Ce projet est financé par le
gouvernement du Québec dans le cadre
du Plan pour une économie verte 2030.



AVANT-PROPOS

L'Institut national de santé publique du Québec est le centre d'expertise et de référence en matière de santé publique au Québec. Sa mission est de soutenir le ministre de la Santé et des Services sociaux dans sa mission de santé publique. L'Institut a également comme mission, dans la mesure déterminée par le mandat que lui confie le ministre, de soutenir Santé Québec, la Régie régionale de la santé et des services sociaux du Nunavik, le Conseil cri de la santé et des services sociaux de la Baie James et les établissements, dans l'exercice de leur mission de santé publique.

La collection *Recherche et développement* rassemble sous une même bannière une variété de productions scientifiques qui apportent de nouvelles connaissances techniques, méthodologiques ou autres d'intérêt large au corpus de savoirs scientifiques existants.

Le présent rapport méthodologique porte sur la cartographie actuelle du virus du Nil occidental (VNO) au Québec ainsi que sur les projections de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Culex pipiens* (l'un des principaux vecteurs du virus) aux horizons 2030, 2050 et 2080 dans le contexte de changements climatiques.

Il a été élaboré à la demande du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs et financé dans le cadre de l'action A1-010 « *Cartographier et diffuser les risques comme les îlots de chaleur, les pollens allergènes et les zoonoses* » du Plan pour une économie verte 2030.

Ce document s'adresse aux intervenants responsables de la planification et la prise de décision tel que les autorités de santé publique, les décideurs ministériels et autres acteurs de l'adaptation afin de réduire les fardeaux actuels et futurs du VNO.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	V
GLOSSAIRE	VI
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	VII
FAITS SAILLANTS	1
RÉSUMÉ	2
1 INTRODUCTION	5
1.1 Contexte.....	5
1.2 Objectifs.....	6
1.3 Public cible.....	6
2 MÉTHODOLOGIE	7
2.1 Zone d'activité du virus du Nil occidental.....	7
2.1.1 Détermination de la zone d'activité du virus du Nil occidental.....	7
2.1.2 Sources des données	7
2.1.3 Cartographie de la zone d'activité du VNO.....	8
2.2 Projections de la zone climatique favorable à la transmission du virus du Nil occidental par <i>Culex pipiens</i>	9
2.2.1 Effets des changements climatiques sur la transmission du virus du Nil occidental par <i>Culex</i>	9
2.2.2 Détermination d'un indicateur thermique	9
2.2.3 Paramètres des projections climatiques	11
2.2.4 Sources de données climatiques	12
2.2.5 Cartographie de l'indicateur thermique.....	12
2.3 Facteurs à croiser avec les cartes du virus du Nil occidental.....	13
2.3.1 Identification de facteurs d'exposition.....	13
2.3.2 Identification de facteurs de vulnérabilité.....	13
2.3.3 Sources de données des facteurs d'exposition et de vulnérabilité	14
2.3.4 Cartographie des facteurs d'exposition et de vulnérabilité.....	14
2.4 Disponibilité des cartes sur le Géoportail	14
3 RÉSULTATS	15
3.1 Carte de la zone d'activité du virus du Nil occidental.....	15

3.2	Choix de l'indicateur thermique	16
3.3	Cartes de la zone climatique favorable à la transmission du virus du Nil occidental par <i>Culex pipiens</i>	17
3.4	L'utilisation des cartes avec des facteurs d'exposition et de vulnérabilité	20
3.4.1	Facteurs d'exposition identifiés.....	20
3.4.2	Facteurs de vulnérabilité identifiés	29
3.4.3	Utilisation des cartes du virus du Nil occidental avec les facteurs d'exposition et de vulnérabilité	29
4	DISCUSSION.....	33
4.1	Interprétation et limites des cartes.....	33
4.1.1	Zone d'activité du virus du Nil occidental.....	33
4.1.2	Projections de la zone climatique favorable à la transmission du virus du Nil occidental par <i>Culex pipiens</i>	34
4.1.3	Ajout de facteurs d'exposition et de vulnérabilité	35
5	CONCLUSION.....	36
6	RÉFÉRENCES.....	37
	ANNEXE 1 - PERSONNES CONSULTÉES POUR LE PROJET	41

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1	Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données.....	21
Tableau 2	Facteurs de vulnérabilité sélectionnés et sources des données	30
Figure 1	Zone d'activité du VNO au Québec, correspondant au territoire où se trouvent de cas rapportés de VNO selon les données de surveillance 2002-2023	15
Figure 2	Zone climatique favorable à la transmission du VNO par <i>Culex pipiens</i> selon les relevés historiques de températures moyennes saisonnières 1989-2018	18
Figure 3	Zone climatique favorable à la transmission du VNO par <i>Culex pipiens</i> selon le 50e percentile des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre SSP2-4.5 pour les horizons 2030, 2050 et 2080.....	18
Figure 4	Zone climatique favorable à la transmission du VNO par <i>Culex pipiens</i> selon le 50e percentile des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre SSP3-7.0 pour les horizons 2030, 2050 et 2080.....	19
Figure 5	Zone d'activité du VNO au Québec, selon les données de surveillance 2002-2023, et l'écoumène de la population en 2021.....	31
Figure 6	Zone d'activité du VNO au Québec, selon les données de surveillance 2002-2023, et les centres équestres.....	32

GLOSSAIRE

Culex pipiens : L'un des principaux vecteurs du virus du Nil occidental au Québec.

Culex pipiens/restuans : Groupement de deux espèces de moustiques, *Culex pipiens* et *Culex restuans*, au Québec, en raison de leurs similitudes morphologiques, qui rendent difficile leur distinction fiable sans analyses moléculaires.

Écoumène : Désigne la surface terrestre habitée, généralement là où des habitants ont établi leur résidence permanente. Il comprend les îlots de diffusion ayant une densité de population minimale d'au moins 0,4 habitant au km².

Écozone : Vaste zone de la surface terrestre se distinguant par des caractéristiques biogéographiques particulières.

Facteur d'exposition : Élément qui peut augmenter le risque d'exposition au virus du Nil occidental.

Facteur de vulnérabilité : Élément qui peut entraîner le développement des formes plus sévères de l'infection par le virus du Nil occidental.

Hôtes réservoirs du virus du Nil occidental (VNO) : Oiseaux qui peuvent être infectés par le VNO à la suite d'une piqûre de moustique et qui peuvent retransmettre le virus aux moustiques.

Hôtes accidentels du virus du Nil occidental (VNO) : Mammifères (principalement les humains et les chevaux) qui peuvent être infectés par le VNO à la suite d'une piqûre de moustique, mais qui ne peuvent généralement pas transmettre le virus.

Indicateur : Données dont le suivi, dans le temps et/ou dans l'espace, permet d'apprécier ou de mesurer des changements intervenus (ou des différences).

Lots de moustiques : Regroupement de jusqu'à 50 individus d'une même espèce capturés dans le même piège et à la même date. Ces regroupements peuvent être testés ensemble pour la présence d'un agent pathogène, comme le virus du Nil occidental.

Vecteurs du virus du Nil occidental (VNO) : Moustiques porteurs du VNO qui peuvent le transmettre à un hôte par une piqûre.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AIC	Critère d'information d'Akaike (de l'anglais <i>Akaike information criterion</i>)
AUC	Aire sous la courbe (de l'anglais <i>Area Under the Curve</i>)
CMIP6	Projet d'intercomparaison des modèles couplés (de l'anglais <i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 6</i>)
ELISA	Méthode immuno-enzymatique sur support solide (de l'anglais <i>enzyme-linked immunosorbent assay</i>)
GES	Gaz à effet de serre
IHC	Immunohistochimie
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
PCR	Réaction de polymérisation en chaîne (de l'anglais <i>polymerase chain reaction</i>)
RCas	Réanalyse canadienne de Surface (de l'anglais <i>Canadian Surface Reanalysis</i>)
SSP	Scénarios d'évolutions socio-économiques (de l'anglais <i>Shared Socioeconomic Pathways</i>)
VNO	Virus du Nil occidental

FAITS SAILLANTS

L'objectif de ce projet est de développer et de publier les premières cartes de répartition du virus du Nil occidental (VNO) au Québec afin de soutenir la planification et la prise de décision des autorités de santé publique, des décideurs ministériels et d'autres acteurs de l'adaptation.

Ce rapport présente la méthodologie utilisée pour réaliser la cartographie de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Culex pipiens* (l'un des principaux vecteurs du VNO) au Québec en contexte de changements climatiques.

- La zone d'activité du VNO correspond au territoire où des cas de VNO ont été documentés et où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO actuellement. Le virus a été détecté dans 496 municipalités, mais il a principalement été observé dans le sud du Québec (notamment en Outaouais, Montérégie, dans la région métropolitaine de Montréal et le long de la vallée du fleuve Saint-Laurent).
- Des projections de la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Culex pipiens* ont été générées en utilisant les températures moyennes saisonnières (calculées d'avril à septembre) aux horizons 2030, 2050 et 2080 sous deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Cette zone représente le territoire où le climat pourrait être favorable à la transmission du VNO par ce vecteur dans le futur. À l'horizon 2030, la zone climatique favorable à la transmission du virus couvre la majorité du sud du Québec, de manière similaire pour les deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Aux horizons 2050 et 2080, la zone progresse de plus en plus vers le nord du Québec.
- Plusieurs facteurs d'exposition et de vulnérabilité ont été identifiés et classés en cinq catégories : la distribution de la population humaine, les activités professionnelles ou récréatives à risque, la distribution des hôtes animaux, l'écologie favorable aux moustiques et les sous-groupes vulnérables de la population humaine. Le croisement des cartes avec différents facteurs d'exposition et de vulnérabilité géolocalisés permettra d'identifier les zones où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourraient être déployées en priorité pour réduire les fardeaux actuels et futurs du VNO.

RÉSUMÉ

Jusqu'à présent, aucune carte de distribution à portée provinciale du virus du Nil occidental (VNO) n'a été publiée au Québec. Ce rapport présente la méthodologie utilisée pour réaliser la cartographie de la zone d'activité du VNO et de la zone favorable à la transmission du virus par *Culex pipiens* (l'un des principaux vecteurs) au Québec en contexte de changements climatiques. Il présente non seulement les cartes produites, mais également des facteurs d'exposition et de vulnérabilité géolocalisés qui peuvent être croisés avec ces cartes pour identifier les zones où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourraient être déployées prioritairement pour diminuer les fardeaux actuels et futurs du VNO.

Développement de la carte de la zone d'activité du VNO

- La zone d'activité du VNO correspond au territoire où des cas de VNO ont été documentés par la surveillance humaine, animale et entomologique de 2002 à 2023 au Québec. Cette zone indique où il y a une probabilité plus élevée de présence du virus.
- Différentes échelles géographiques ont été utilisées pour chaque volet de surveillance.
 - **Cas humains** : Les municipalités ont été utilisées comme échelle géographique pour les cas humains afin de préserver la confidentialité de chaque cas.
 - **Cas animaux** : Deux échelles géographiques ont été utilisées pour préserver la confidentialité des cas d'animaux domestiques et pour s'adapter à la disponibilité des coordonnées spatiales. La première échelle correspond à des zones tampons d'une résolution de deux kilomètres qui ont été appliquées pour les animaux sauvages à partir des coordonnées spatiales où les animaux morts ont été retrouvés. La deuxième échelle est celle de la municipalité. Elle a été appliquée aux cas d'animaux sauvages sans coordonnée spatiale ainsi qu'aux cas d'animaux domestiques afin de préserver la confidentialité des propriétaires liée à l'élevage.
 - **Moustiques infectés** : Les zones tampons de deux kilomètres de résolution ont été utilisées pour représenter des lots de moustiques porteurs du VNO à l'aide de leurs coordonnées spatiales.
- Entre 2002 et 2023, le VNO a été détecté par la surveillance humaine, animale ou entomologique dans 496 municipalités réparties dans toutes les régions sociosanitaires du Québec à l'exception du Nunavik et des Terres-Cries-de-la-Baie-James.
- Le VNO a été principalement observé dans le sud du Québec, notamment en Outaouais, Montérégie, dans la région métropolitaine de Montréal et le long de la vallée du fleuve Saint-Laurent.
- Toutefois, il est difficile de prédire la circulation virale dans l'espace et dans le temps étant donné la nature cyclique de la présence et de l'intensité du VNO.

- La détection du virus n'est pas uniforme à l'intérieur de la zone d'activité en raison de la variabilité de la présence et des déplacements de moustiques et d'animaux infectés dans l'environnement. De plus, l'absence d'activité du VNO sur les cartes en dehors de cette zone ne doit pas être interprétée comme une absence de risque d'exposition au virus, puisque les oiseaux et les moustiques infectés peuvent se déplacer sur des distances variables.

Choix de l'indicateur thermique pour représenter la zone climatique favorable à la transmission du VNO

- Deux études ont développé des modèles mécanistes à partir des caractéristiques de *Cx. pipiens* et du VNO afin de déterminer l'influence de la température sur la transmission du virus par ce vecteur. Shocket et coll. 2020 ont fixé la température médiane inférieure de transmission par *Cx. pipiens* à 16,8°C (IC95% : 14,9°C-17,8°C), tandis que Di Pol et coll. 2022 ont estimé qu'il n'y a pas de transmission sous 14°C par *Cx. pipiens* en Europe.
- Des analyses statistiques ont été réalisées pour examiner les relations entre les températures et les lots de *Cx. pipiens/restuans* échantillonnés au Québec, afin de sélectionner et valider un indicateur thermique ainsi que sa période d'activité. L'indicateur choisi sera utilisé pour créer les cartes de la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* au Québec.
- Des tests du chi carré ont été exécutés pour étudier la relation entre le statut des lots de moustiques (négatif ou positif) et les limites thermiques nécessaires à la transmission du VNO (supérieure ou inférieure à 14°C ou 15°C), en utilisant les températures moyennes saisonnières calculées pour quatre périodes d'activité (avril à septembre, avril à octobre, mai à septembre et mai à octobre) selon le lieu et la date de capture de chaque lot.
- Des régressions logistiques ont été réalisées pour explorer l'impact de la température moyenne saisonnière (calculée durant les mêmes quatre périodes d'activités), la latitude, l'écozone et l'année sur la variable binaire du statut des lots de moustiques (négatif ou positif).
- À la suite de ces analyses, l'indicateur thermique a été choisi pour déterminer la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens*. Cet indicateur est défini par une température moyenne saisonnière (calculée d'avril à septembre) supérieure ou égale à 14°C, correspondant à la période d'activité actuelle du virus et à une limite thermique conservatrice où la majorité des lots de moustiques positifs ont été échantillonnés au Québec.

Élaboration des cartes de la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens*

- Des projections climatiques post-traitées ont été générées pour l'ensemble du Québec (résolution de 10 km x 10 km) aux horizons 2030, 2050 et 2080 sous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) modérées (SSP2-4.5) et élevées (SSP3-7.0).

- Les températures moyennes saisonnières (calculées d'avril à septembre) ont été estimées à partir d'une sélection de 14 modèles climatiques de CMIP6 (Projet d'intercomparaison des modèles couplés). Cette sélection de modèles vise à former un échantillon représentatif des connaissances actuelles sur la sensibilité climatique.
- À l'horizon 2030, la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* couvre la majorité du sud du Québec, de manière similaire pour les deux scénarios d'émissions de GES. Aux horizons 2050 et 2080, la zone progresse de plus en plus vers le nord de la province, avec une étendue plus rapide pour le scénario SSP3-7.0 que pour le scénario SSP2-4.5. Cependant, les cartes doivent être interprétées avec prudence en raison des incertitudes liées aux projections climatiques et à l'utilisation du 50^e percentile.
- La transmission du VNO chez l'humain n'est pas systématique dans une zone climatique favorable, car un individu doit être exposé à un moustique infecté pour contracter le virus. D'autres facteurs climatiques et écologiques qui ne sont pas pris en compte dans l'analyse des données peuvent influencer la circulation du VNO dans l'espace et dans le temps.

Croisement des cartes avec des facteurs d'exposition et de vulnérabilité

- Des facteurs d'exposition et de vulnérabilité géolocalisés ont été identifiés pour illustrer leur utilisation avec des cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens* au Québec sur le Géoportail de santé publique du Québec. Ce croisement pourrait aider à identifier des zones où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourraient être déployées en priorité afin de diminuer les fardeaux actuels et futurs du VNO.
 - Des facteurs d'exposition ont été classés en quatre catégories :
 1. La distribution de la population humaine;
 2. Les activités humaines professionnelles ou récréatives à risque;
 3. La distribution des hôtes animaux;
 4. L'habitat et l'écologie favorable aux vecteurs.
 - Des facteurs de vulnérabilité ont été sélectionnés en fonction des sous-groupes vulnérables de la population humaine.
 - Par exemple, les propriétaires des centres équestres situés dans la zone d'activité du VNO pourraient réfléchir à différentes interventions (ex. : la vaccination ou la vidange des contenants à l'extérieur) pour limiter l'infection du virus chez les chevaux.

Ces cartes permettront d'orienter la planification et la prise de décision de différents acteurs responsables d'interventions associées aux zoonoses (ex. : le réseau de la santé publique, les décideurs ministériels, les municipalités ou les établissements d'enseignement et de recherche) pour réduire les fardeaux actuels et futurs du VNO.

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Dans le cadre du Plan pour une économie verte 2030, sous la responsabilité du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), la mise en œuvre de l'action « *Cartographier et diffuser les risques comme les îlots de chaleur, les pollens allergènes et les zoonoses* » a été confiée au ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). La Direction des risques biologiques de l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) a été nommée responsable de la cartographie des zoonoses en intégrant des projections climatiques (action A1-010 – volet Zoonoses).

En mai 2024, les cartes de répartition actuelle et future des *Ixodes scapularis* en contexte de changements climatiques ont été publiées. Il s'agissait de la première thématique cartographiée. Le virus du Nil occidental (VNO), une maladie transmise par les moustiques, a été choisi comme deuxième thématique. L'*Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques* de l'INSPQ (ci-après Observatoire) et le Groupe d'experts sur les maladies transmises par les moustiques de l'INSPQ ont été consultés pour la réalisation des cartes.

Le VNO représente un enjeu de santé publique au Québec en raison de son endémicité et des conséquences en matière de morbidité et de mortalité. Depuis 2003, le VNO est une maladie à déclaration obligatoire par les laboratoires et les médecins (1). Parmi les 541 cas déclarés au Québec entre 2003 et 2018, la majorité (70 %) a présenté une atteinte neurologique et 24 personnes sont décédées à la suite de cette infection (2).

Ce virus est généralement transmis par la piqûre d'un moustique devenu porteur du virus après un repas sanguin sur un oiseau infecté (3,4). Au Québec, les espèces *Culex pipiens* (*Cx. pipiens*) et *Culex restuans* (*Cx. restuans*) sont les principaux vecteurs du VNO. Ces deux espèces de moustiques sont souvent regroupées sous le nom *Culex pipiens/restuans* en raison de leurs similitudes morphologiques, ce qui rend difficile leur distinction fiable sans analyses moléculaires. De plus, les études analysant la transmission du VNO par ces vecteurs se concentrent principalement sur *Cx. pipiens* et non sur *Cx. restuans*. Deux autres espèces de moustiques sont des vecteurs secondaires : *Aedes vexans* et *Coquillettidia perturbans* (3,5).

Les oiseaux sont les hôtes réservoirs du VNO. Ils peuvent être infectés à la suite d'une piqûre de moustique et peuvent ensuite retransmettre le virus aux moustiques (4). Toutefois, le VNO peut également être transmis aux mammifères, notamment les humains et les chevaux qui sont considérés des hôtes accidentels, c'est-à-dire qu'ils peuvent être infectés à la suite d'une piqûre de moustique, mais ils ne peuvent généralement pas transmettre le virus (6,7). Par conséquent, la surveillance du VNO au Québec inclut des volets humain, animal et entomologique (1).

Les changements climatiques, principalement les hausses de températures et les fluctuations des précipitations, peuvent impacter la transmission du VNO en influençant le développement et l'activité des moustiques ainsi que la réplication du virus (5,8). Plus spécifiquement, ces changements pourraient accélérer l'élargissement des zones de transmission du VNO au Québec dans le futur, car les conditions favorables à la survie des moustiques et à la réplication du virus devraient être plus souvent atteintes.

Jusqu'à présent, aucune carte à l'échelle provinciale de répartition du VNO n'a été publiée pour le Québec. Ce projet propose d'élaborer dans un premier temps, des cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens* en contexte de changements climatiques. Il propose également différents facteurs d'exposition et de vulnérabilité géolocalisés qui pourraient être croisés avec les cartes afin d'illustrer les zones où il y a une probabilité plus élevée de présence pour le VNO et où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourraient être déployées.

1.2 Objectifs

L'objectif général du projet est de développer des cartes pour soutenir la planification et la prise de décision des autorités de santé publique, des décideurs ministériels et d'autres acteurs de l'adaptation.

Objectif 1 : Cartographier la zone d'activité du VNO au Québec.

Objectif 2 : Cartographier la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Culex pipiens* au Québec aux horizons temporels 2030, 2050 et 2080, en fonction de différents scénarios d'émissions de gaz à effets de serre (GES).

Objectif 3 : Illustrer l'utilisation possible de différents facteurs d'exposition et de vulnérabilité géolocalisés avec les cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens*, afin de déterminer quelles interventions de santé publique ou autres mesures d'adaptation pourraient être déployées.

1.3 Public cible

Le public cible de ces cartes est large et inclut : les intervenants en santé publique, les décideurs ministériels et d'autres organismes gouvernementaux, les municipalités et d'autres organismes municipaux, les établissements d'enseignement et de la recherche, les entreprises, les organismes à but non lucratif et les citoyens. Les cartes produites seront utiles aux responsables des appréciations des risques et de développement des plans d'adaptation aux changements climatiques.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Zone d'activité du virus du Nil occidental

2.1.1 Détermination de la zone d'activité du virus du Nil occidental

La zone d'activité du VNO définie ci-dessous a été développée à partir des données de la surveillance intégrée, ce qui inclut des volets humain, animal et entomologique (1) :

La zone d'activité du VNO correspond au territoire où des cas humains ET/OU des cas animaux ET/OU des lots de moustiques porteurs du virus ont été rapportés.

La présence des cas humains, des cas animaux et des lots de moustiques porteurs du virus est utilisée comme des signaux de l'activité virale au Canada (9-13) et aux États-Unis (14). Par conséquent, des cas humains, des cas animaux et des lots de moustiques porteurs du virus et rapportés par la surveillance au Québec ont servi d'indicateurs de l'activité virale pour délimiter la zone où le virus a été présent dans la province. L'utilisation de la zone d'activité du VNO dans le cadre de ce projet a été discutée et validée par les membres de l'Observatoire et le Groupe d'experts sur les maladies transmises par les moustiques de l'INSPQ.

2.1.2 Sources des données

Pour identifier la zone d'activité du VNO au Québec, plusieurs types de données ont été recueillis :

- **Les données de surveillance humaine (2002-2023)** qui rassemblent les cas humains de VNO confirmés et probables (y compris les cas asymptomatiques détectés par Héma-Québec) (1).

Seuls les cas humains de VNO acquis localement au Québec ont été inclus dans le calcul de la zone d'activité.

- **Les données de surveillance animale (2002-2023)** qui regroupent les cas d'animaux qui ont été testés pour le VNO. Ce virus fait l'objet d'une surveillance passive chez les animaux domestiques et sauvages par les autorités de santé animale (1). Cette surveillance comprend deux composantes :

1. Des animaux domestiques possiblement infectés par le VNO et signalés par un médecin vétérinaire au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec de 2003 à 2023 (15);
2. Des oiseaux sauvages et d'autres animaux sauvages possiblement infectés par le VNO et signalés au Centre québécois sur la santé des animaux sauvages de 2002 à 2023 (16).

Seuls les cas animaux ayant un test diagnostique positif du VNO (ex. : isolement du virus des tissus, ELISA, PCR, et/ou IHC) ont été retenus dans le calcul de la zone d'activité (17).

- **Les données de surveillance entomologique (2003-2006 et 2010-2023)** qui réunissent les lots de moustiques échantillonnés pendant la période d'activité du VNO (1). Ces lots représentent un regroupement pouvant aller jusqu'à 50 individus d'une même espèce capturés dans le même piège et à la même date, qui peuvent être testés ensemble pour la présence du virus. Cette surveillance comprend deux composantes :
 1. Identification et analyse des lots de moustiques provenant de la surveillance entomologique provinciale de 2003 à 2006 et de 2013 à 2021 réalisée au Laboratoire de santé publique du Québec pour détecter la présence du VNO (1);
 2. Échantillonnage, identification et analyse des lots de moustiques par la firme GDG Environnement dans plusieurs municipalités du Québec de 2010 à 2023 afin de détecter la présence du VNO (18).

Seuls les lots de moustiques avec une détection PCR positive du VNO ont été inclus dans le calcul de la zone d'activité.

2.1.3 Cartographie de la zone d'activité du VNO

La zone d'activité du VNO a été calculée à l'aide des données précédemment mentionnées pour l'ensemble du Québec sur la période de 2002 à 2023 afin de déterminer le territoire présentant une probabilité plus élevée de présence du virus :

- Les différentes bases de données ont été nettoyées et validées notamment par le retrait des données manquantes ou doublonnées, la vérification de la géolocalisation, l'exclusion des cas animaux sans coordonnées spatiales ni nom de municipalité associée et l'exclusion des cas humains ayant voyagé à l'extérieur du Québec ou exempt de municipalité (d'exposition ou de résidence) rapportée;
- Les données de chaque volet de surveillance ont été importées et cartographiées dans le système d'information géographique [QGIS](#) version 3.30.2;
- L'ensemble des données de surveillance humaine, animale et entomologique a été agrégé pour former la zone d'activité du VNO de 2002 à 2023 au Québec, en fusionnant les zones tampons et les municipalités de chaque cas ou lot de moustique.

Différentes échelles géographiques ont été utilisées pour chaque volet de surveillance :

- **Cas humains** : Les municipalités ont été utilisées comme échelle géographique afin de préserver la confidentialité des cas humains;
- **Cas animaux** : Deux échelles géographiques ont été utilisées pour préserver la confidentialité des cas d'animaux domestiques et pour s'adapter à la disponibilité des coordonnées spatiales. La première échelle correspond à des zones tampons d'une résolution de deux kilomètres qui ont été appliquées pour les animaux sauvages à partir des coordonnées spatiales où les animaux morts ont été retrouvés. Ces animaux, qu'ils soient résidents ou migrants de courte distance, peuvent contribuer à la propagation locale du virus (19). La

deuxième échelle est celle de la municipalité. Elle a été appliquée aux cas d'animaux sauvages sans coordonnées spatiales ainsi qu'aux cas d'animaux domestiques afin de préserver la confidentialité des propriétaires liée à l'élevage;

- **Lots de moustique** : Des zones tampons de deux kilomètres de résolution ont été créées en utilisant les coordonnées spatiales des lots de moustiques porteurs du VNO puisque la distance de déplacement des moustiques est de deux kilomètres (20).

2.2 Projections de la zone climatique favorable à la transmission du virus du Nil occidental par *Culex pipiens*

2.2.1 Effets des changements climatiques sur la transmission du virus du Nil occidental par *Culex*

Les changements climatiques, principalement les hausses de températures et les fluctuations de précipitations, peuvent impacter la transmission du VNO en influençant le développement et l'activité des moustiques, ainsi que la réplication du virus (5,8). En général, la relation entre le développement et l'abondance des moustiques et les précipitations est non linéaire. De plus, les associations statistiques avec la température sont fortes et suivent une courbe en forme de cloche, où les températures trop chaudes ne sont pas favorables (8,21). Plus spécifiquement, les hausses de températures pourraient accélérer l'élargissement des zones de transmission du VNO au Québec dans le futur, car les températures favorables à la survie des moustiques et à la réplication du virus devraient être plus souvent atteintes.

La recherche de relations significatives dans la littérature entre un indicateur climatique et les deux principaux vecteurs du VNO au Québec (*Cx. pipiens* et *Cx. restuans*) a été privilégiée. Plusieurs études ont démontré que la température est un facteur prédictif de l'infection et de la transmission du VNO chez ces deux espèces de moustiques (22-26). Cependant, les études analysant des limites thermiques nécessaires à la transmission du VNO n'ont été menées qu'avec *Cx. pipiens* et non avec *Cx. restuans* (22-25). En conséquence, un indicateur relié à la température a été choisi afin d'identifier les zones climatiques favorables à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* seulement dans les prochaines décennies en contexte de changements climatiques.

2.2.2 Détermination d'un indicateur thermique

Deux études ont développé des modèles mécanistes en utilisant le R_0 (le nombre de reproduction de base) à partir des caractéristiques de *Cx. pipiens* et du VNO afin de déterminer l'influence de la température sur la transmission du virus par ce vecteur (22,23). Shocket et coll. 2020 ont établi que 16,8°C (IC95% : 14,9°C-17,8°C) est la température médiane pour la limite thermique inférieure nécessaire à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* (22). Cette limite thermique est considérée plus conservatrice que 24,5°C, qui est la température médiane pour la limite thermique optimale nécessaire à la transmission du virus par cette espèce de moustique (22). Di Pol et coll. 2022 ont déterminé que l'établissement du VNO était possible entre 14°C et

34,3°C pour les *Cx. pipiens* en Europe, avec la température optimale se situant à 23,7°C (23). Cependant, la transmission du VNO par *Cx. pipiens* ne devrait pas se produire sous 14°C, car la compétence du vecteur est nulle en dessous de cette limite thermique (23).

À noter que ces études utilisent des caractéristiques de *Cx. pipiens* provenant d'analyses réalisées avec des moustiques de New York et de Pennsylvanie au début de l'émergence du VNO aux États-Unis (24,25). Plus spécifiquement, Kilpatrick et coll. 2008 ont montré qu'une faible transmission par *Cx. pipiens* pouvait se produire entre 14°C et 15°C en utilisant les souches du virus de 1999 et 2002 (25). Par conséquent, les analyses effectuées dans le cadre de ce projet ont exploré la possibilité d'utiliser des limites thermiques de 14°C ou 15°C dans un contexte québécois.

Des analyses statistiques ont été effectuées en R (version 4.3.0) pour examiner les relations entre les températures et les lots de *Cx. pipiens/restuans* échantillonnés au Québec, afin de sélectionner et valider un indicateur thermique et sa période d'activité. L'indicateur thermique choisi sera utilisé pour créer les cartes de la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens*. Les températures mensuelles maximales et minimales, à une résolution d'un kilomètre, du jeu de données Daymet ont été utilisées pour calculer les températures moyennes saisonnières¹ (27).

- Des tests du chi carré ont été exécutés pour étudier la relation entre le statut des lots de moustiques (négatif ou positif) et les limites thermiques nécessaires à la transmission du VNO (supérieure ou inférieure à 14°C ou 15°C), en utilisant les températures moyennes saisonnières calculées selon le lieu et la date de capture de chaque lot. La température moyenne saisonnière a été calculée pour quatre périodes d'activité (avril à septembre, avril à octobre, mai à septembre et mai à octobre) et deux limites thermiques ont été utilisées (14°C ou 15°C). Huit tests ont été effectués, soit un test pour chaque combinaison de période d'activité et de limite thermique.
- Des régressions logistiques ont été réalisées pour explorer l'impact de plusieurs variables prédictives sur la variable binaire du statut des lots de moustiques (négatif ou positif). Les variables prédictives incluaient : la température moyenne saisonnière (variable continue), la latitude (variable continue), l'écozone (variable catégorielle avec trois niveaux : écozone 6 - bouclier boréal, écozone 7 - maritime de l'Atlantique et écozone 8 - plaines à forêts mixtes) et l'année (variable discrète). La température moyenne saisonnière a été calculée pour quatre périodes d'activité (avril à septembre, avril à octobre, mai à septembre et mai à octobre) et deux regroupements d'années ont été utilisés (2003-2022 et 2013-2022). Huit modèles ont été créés, soit un modèle pour chaque combinaison de période d'activité et de regroupement d'années. Les modèles prédictifs ont été développés à partir des lots de *Cx. pipiens/restuans* (80 % de données d'entraînement et 20 % de données de test) afin de déterminer quelles variables affectaient le statut des lots de moustiques en utilisant la fonction *stepAIC* du

¹ Les températures moyennes saisonnières ont été mesurées en degrés Celsius et calculées pendant la période d'activité saisonnière en additionnant les températures maximales et minimales quotidiennes, puis en les divisant par deux (28).

paquet MASS (29) et les mesures diagnostiques telles que le critère d'information d'Akaike² (AIC) et la valeur de l'aire sous la courbe³ (AUC).

Par conséquent, les températures moyennes saisonnières supérieures ou égales à la limite thermique statistiquement significative et adaptée au contexte québécois ont été utilisées pour définir et ensuite cartographier la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens*. Plus spécifiquement, une période d'activité d'avril à septembre et une limite thermique de 14°C ont été choisies, car elles représentent le mieux la période d'activité virale actuelle au Québec et le seuil le plus conservateur à laquelle la majorité des lots de moustiques positifs ont été détectés. L'utilisation de cet indicateur thermique dans le cadre de ce projet a été discutée et validée par les membres de l'Observatoire et du Groupe d'experts des maladies transmises par les moustiques de l'INSPQ.

2.2.3 Paramètres des projections climatiques

Les paramètres des projections climatiques utilisés pour ce projet ont été définis par le MELCCFP, en se basant sur les recommandations d'Ouranos pour les projets d'adaptation aux changements climatiques (30,31) :

- **Horizons temporels 2030, 2050 et 2080** : Ces horizons temporels correspondent aux périodes retenues pour le calcul des indicateurs thermiques, soit respectivement 2021-2050, 2041-2070 et 2071-2100 pour 2030, 2050 et 2080. Les moyennes sur 30 ans permettent de prendre en compte les fluctuations naturelles du climat (30).
- **Scénarios d'émissions de GES SSP2-4.5 et SSP3-7.0** : Le scénario SSP2-4.5 prend en compte des **émissions modérées** de gaz à effet de serre (GES) tandis que le scénario SSP3-7.0 suppose des **émissions élevées** de gaz à effet de serre (30,32). SSPx-y est l'abréviation d'un scénario d'émissions de GES, où x est le numéro (1 à 5) des scénarios d'évolutions socio-économiques (de l'anglais *Shared Socioeconomic Pathways* ou SSP) qui a été utilisé pour développer la trajectoire d'émissions de GES et, y indique la valeur approximative du forçage radiatif (en W/m^2) atteint à la fin du siècle (32). Par exemple, le scénario SSP2 envisage une trajectoire intermédiaire dans laquelle les tendances socio-économiques se poursuivent sans déviations substantielles des investissements dans l'éducation, la santé, la croissance économique et le fonctionnement des institutions (30,32). Cette trajectoire d'émissions induit un forçage radiatif de $4.5W/m^2$ en 2100, soit un niveau de réchauffement global d'environ 2,7°C par rapport à la période préindustrielle (31). En comparaison, le scénario SSP3 se caractérise par de grands défis en matière d'atténuation et d'adaptation. Dans ce scénario, l'accent est mis sur des problèmes régionaux et locaux, avec peu d'investissements dans l'éducation ou la santé, une croissance démographique rapide et des inégalités croissantes

² Étant donné un ensemble de modèles pour les données, la mesure AIC estime la qualité de chaque modèle par rapport à chacun des autres modèles.

³ La valeur AUC est une mesure sommaire de la courbe ROC qui reflète la capacité du test à distinguer la classification binaire.

(30,32). Cette trajectoire d'émissions induit un forçage radiatif de 7.0W/m^2 en 2100, avec un réchauffement global estimé d'environ $3,6^\circ\text{C}$ par rapport à la période de 1850 à 1900 (31).

- **50^e percentile** : La valeur finale des températures moyennes saisonnières utilisées est le 50^e percentile, ou médiane de l'ensemble de projections climatiques, qui représente la valeur pour laquelle la moitié des résultats des modèles climatiques projettent une température supérieure ou égale à 14°C et l'autre moitié des résultats projettent une température inférieure à cette valeur (30).

2.2.4 Sources de données climatiques

Les températures moyennes saisonnières ont été générées et fournies par Ouranos avec une résolution de $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ couvrant l'ensemble du Québec pour les horizons temporels et les scénarios d'émissions de GES mentionnés ci-dessus. Lavoie et coll. 2024 décrivent les données climatiques de base, la méthodologie pour produire ces données ainsi que le processus de validation (33).

Pour chaque scénario d'émissions de GES (SSP2-4.5 et SSP3-7.0), les températures moyennes saisonnières (calculées d'avril à septembre) ont été estimées par Ouranos à partir d'une sélection de 14 modèles climatiques de CMIP6 (Projet d'intercomparaison des modèles couplés, de l'anglais *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) (33). Cette sélection de modèles vise à former un échantillon représentatif des connaissances actuelles sur la sensibilité climatique.

Afin d'avoir des données climatiques historiques représentatives du climat récent, les températures moyennes saisonnières (calculées d'avril à septembre) ont également été fournies par Ouranos pour la période 1989-2018. Ces données de température proviennent de la Réanalyse canadienne de Surface (RCas ou de l'anglais *Canadian Surface Reanalysis*), un produit généré avec un modèle de prévision météorologique, sur une grille de $10\text{ km} \times 10\text{ km}$, dans lequel des observations sont assimilées (34).

2.2.5 Cartographie de l'indicateur thermique

Les températures moyennes saisonnières (calculées d'avril à septembre) ont été importées et cartographiées dans QGIS pour les horizons 2030, 2050 et 2080, ainsi que pour la période 1989-2018, avec une résolution de $10\text{ km} \times 10\text{ km}$. Deux cartes ont été produites pour les scénarios d'émissions de GES SSP2-4.5 et SSP3-7.0, comprenant un gradient de couleurs pour différencier les trois horizons (couleur plus foncée pour 2030 à plus clair pour 2080). Une carte supplémentaire a été produite en utilisant les données de températures de la RCas pour la période 1989-2018 (34).

2.3 Facteurs à croiser avec les cartes du virus du Nil occidental

Les facteurs d'exposition correspondent aux facteurs qui peuvent augmenter le risque d'exposition au VNO, alors que les facteurs de vulnérabilité correspondent aux facteurs qui peuvent entraîner le développement des formes plus sévères de l'infection par le VNO.

2.3.1 Identification de facteurs d'exposition

Pour mieux identifier les zones où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourraient être déployées en priorité, l'identification de facteurs d'exposition s'est appuyée sur deux synthèses de connaissances réalisées précédemment par l'INSPQ (21,35) et des études complémentaires visant à décrire des facteurs non météorologiques qui influencent l'épidémiologie du VNO (4,36-46).

Les facteurs d'exposition retenus sont ceux qui étaient simples et pertinents pour illustrer l'utilisation possible des cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus au Québec. Ces facteurs ont été classés en quatre catégories :

1. La distribution de la population humaine;
2. Les activités humaines professionnelles ou récréatives à risque;
3. La distribution des hôtes animaux;
4. L'habitat et l'écologie favorable aux vecteurs.

2.3.2 Identification de facteurs de vulnérabilité

L'identification de facteurs de vulnérabilité s'est appuyée sur deux études afin de mieux cibler les zones sur les cartes où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourraient être mises en place prioritairement (47,48). La première est une revue de la littérature sur les facteurs de risque et de vulnérabilité du VNO en Amérique du Nord, tant au niveau individuel qu'au niveau populationnel (47). La deuxième est une étude de cohorte en Ontario analysant les éléments de risque de comorbidité des cas de VNO avec une atteinte neurologique (48).

Tout comme pour les facteurs de risques d'exposition, les facteurs de vulnérabilité retenus sont ceux qui étaient simples et pertinents pour illustrer l'utilisation possible des cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus au Québec. Ces facteurs ont été associés aux sous-groupes vulnérables de la population humaine.

2.3.3 Sources de données des facteurs d'exposition et de vulnérabilité

Une recherche de données géoréférencées disponibles pour les facteurs d'exposition et de vulnérabilité a été effectuée sur le Géoportail de santé publique du Québec de l'INSPQ (<https://cartes.inspq.qc.ca/géoportail/>), Données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/>), Gouvernement ouvert (<https://ouvert.canada.ca/fr>), Forêt ouverte (<https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>) et Statistique Canada (<https://www.statcan.gc.ca/>).

2.3.4 Cartographie des facteurs d'exposition et de vulnérabilité

Les facteurs d'exposition et de vulnérabilité retenus ont été importés, cartographiés et superposés dans QGIS aux cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus pour vérifier leur compatibilité dans un outil géomatique. Le croisement de ces facteurs devait faire ressortir visuellement les zones où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO et où la population humaine serait plus vulnérable selon les facteurs retenus. Cette étape a permis de vérifier l'utilité de ces facteurs pour illustrer l'utilisation des cartes et l'identification de zones prioritaires pour le déploiement des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation.

2.4 Disponibilité des cartes sur le Géoportail

Les cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens* sont mises en ligne sur le Géoportail de santé publique de l'INSPQ (ci-après Géoportail) (49), par l'intermédiaire du Bureau d'information et d'études en santé des populations de l'INSPQ. Ces cartes sont accompagnées des fiches synthèses accessibles dans le Géoportail. De plus, les données et les informations relatives aux cartes sont également disponibles sur Données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/>).

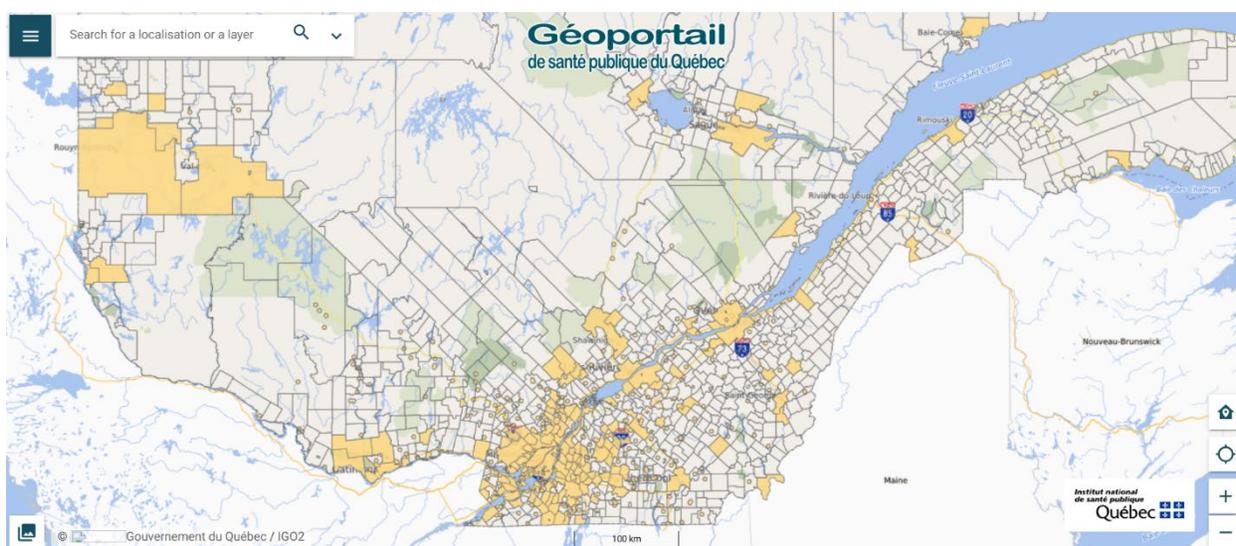
Les facteurs d'exposition et de vulnérabilité identifiés sont également consultables directement sur le Géoportail ou sur d'autres plateformes de données en accès libre. Les utilisateurs des cartes pourront également recenser d'autres facteurs pertinents pour leurs prises de décision, superposer différentes données dans le Géoportail pour créer leur propre carte ou télécharger ces données afin de mener des analyses plus complexes.

3 RÉSULTATS

3.1 Carte de la zone d'activité du virus du Nil occidental

La carte présentée ci-après montre la zone d'activité du VNO de 2002 à 2023 au Québec (en jaune), qui résulte de l'agrégation des données de surveillance humaine, animale et entomologique ([figure 1](#)). Cette zone indique où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO.

Figure 1 Zone d'activité du VNO au Québec, correspondant au territoire où se trouvent de cas rapportés de VNO selon les données de surveillance 2002-2023



En dehors de cette zone, la présence du VNO demeure possible, mais le virus n'a pas été détecté par la surveillance humaine, animale ou entomologique.

La présence du VNO a été mise en évidence par un ou plusieurs volets de surveillance dans 496 municipalités entre 2002 et 2023, soit 39 % des 1 282 municipalités du Québec. Ce virus a été repéré par la surveillance humaine dans 129 municipalités (10 % des 1 282 municipalités), par la surveillance animale dans 477 municipalités (37 %) et par la surveillance entomologique dans 91 municipalités (7 %).

La carte indique que la présence du VNO est principalement observée dans le sud du Québec, notamment en Outaouais, Montérégie, dans la région métropolitaine de Montréal et le long de la vallée du fleuve Saint-Laurent. Néanmoins, le virus a été détecté dans toutes les régions sociosanitaires du Québec à l'exception du Nunavik et des Terres-Cries-de-la-Baie-James.

3.2 Choix de l'indicateur thermique

Des analyses statistiques ont été complétées pour déterminer les relations entre les températures et les lots de *Cx. pipiens/restuans* échantillonnés au Québec afin de sélectionner et valider un indicateur thermique.

Des tests du chi carré ont été utilisés pour évaluer la relation entre le statut des lots de moustiques (négatif ou positif) et les limites thermiques nécessaires à la transmission du VNO (supérieure ou inférieure à 14°C ou 15°C), en utilisant les températures moyennes saisonnières calculées selon le lieu et la date de capture de chaque lot. Huit tests ont été réalisés avec un test pour chaque combinaison de période d'activité et de limite thermique.

- Pour la limite thermique de 14°C, une association significative a été observée entre le statut des lots de moustiques et les températures moyennes saisonnières calculées d'avril à septembre ($\chi^2 = 5.55, p < 0.05$) et d'avril à octobre ($\chi^2 = 7.93, p < 0.01$). Cependant, aucune différence entre le statut des lots de *Cx. pipiens/restuans* n'a pu être démontrée pour les températures moyennes saisonnières calculées de mai à septembre ($\chi^2 = 0.88, p = 0.35$) et de mai à octobre ($\chi^2 = 2.43, p = 0.12$).
- Pour la limite thermique de 15°C, une association significative a été observée entre le statut des lots de *Cx. pipiens/restuans* et les températures moyennes saisonnières calculées d'avril à septembre ($\chi^2 = 11.57, p < 0.001$), d'avril à octobre ($\chi^2 = 61.27, p < 0.001$) et de mai à octobre ($\chi^2 = 7.27, p < 0.01$). Cependant, aucune relation n'a été observée entre le statut des lots et les températures moyennes saisonnières calculées de mai à septembre ($\chi^2 = 1.66, p = 0.20$).

Des régressions logistiques ont été effectuées pour déterminer l'impact de la température moyenne saisonnière (calculées pendant quatre périodes d'activités), la latitude, l'écozone et l'année sur la variable binaire du statut des lots de *Cx. pipiens/restuans* (négatif ou positif).

- Pour les lots de moustique échantillonnés de 2003 à 2022, des associations significatives ont été démontrées entre le statut des lots avec l'année ($p < 0.001$), l'écozone ($p < 0.01$) et les températures moyennes saisonnières calculées pendant les quatre périodes d'activités (avril à septembre, avril à octobre, mai à septembre et mai à octobre; tous $p < 0.001$). La latitude n'avait pas d'effet prononcé sur le statut des lots de moustiques dans chaque modèle ($p > 0.05$). Par conséquent, cette variable prédictive a été supprimée des modèles finaux.
- Pour les lots de moustique échantillonnés de 2013 à 2022, des associations significatives ont été démontrées entre le statut des lots avec l'écozone ($p < 0.01$) et les températures moyennes saisonnières calculées pendant les quatre périodes d'activités (avril à septembre, avril à octobre, mai à septembre et mai à octobre; tous $p < 0.01$). Une association significative a seulement été retrouvée pour la latitude pendant la période d'activité de mai à octobre ($p < 0.001$). L'année n'avait pas d'influence sur le statut des lots de *Cx. pipiens/restuans* ($p > 0.05$). En conséquence, cette variable a été supprimée des modèles finaux.

- En général, l'écozone au sud du Québec (écozone 8 – plaines à forêts mixtes) a plus de probabilité d'avoir des lots de moustique positifs pour le VNO comparé à l'écozone plus au nord (écozone 6 – bouclier boréal).

Par conséquent, l'indicateur thermique statistiquement significatif et adapté au contexte québécois défini ci-dessous a été utilisé :

Une zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Culex pipiens* est définie par une température moyenne saisonnière (calculée d'avril à septembre) supérieure ou égale à 14°C.

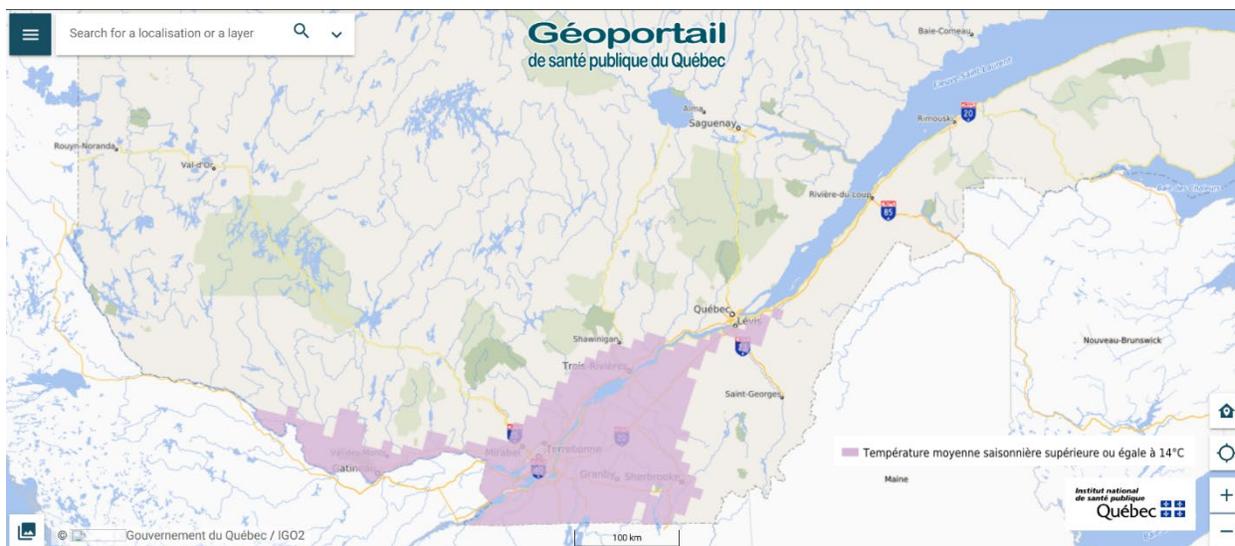
Les résultats des analyses statistiques ont suggéré que des températures moyennes saisonnières pendant la période d'activité du VNO (calculées d'avril à septembre) doivent être supérieures ou égales à 14°C pour que le climat soit favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* au Québec. Cette période saisonnière a été choisie, car elle correspond à la période d'activité actuelle du virus au Québec, qui s'étend généralement de la mi-avril à la fin septembre. De plus, cette limite thermique a été privilégiée plutôt que celle de 15°C, car elle est plus conservatrice et représente le seuil à partir duquel la majorité des lots de moustiques positifs sont détectés au Québec.

La transmission du VNO par *Cx. pipiens* est considérée comme minime en dessous de 14°C, car elle ne devrait pas se produire facilement dans la nature en raison de la nécessité de très longues périodes d'incubation, qui peuvent dépasser la durée de vie des moustiques (23,25). Par conséquent, les températures moyennes saisonnières inférieures à 14°C sont considérées comme non favorables à la transmission du VNO par *Cx. pipiens*.

3.3 Cartes de la zone climatique favorable à la transmission du virus du Nil occidental par *Culex pipiens*

Les cartes présentées ci-dessous démontrent la zone climatique favorable à transmission du VNO par *Cx. pipiens* selon les données de températures de la réanalyse météorologique de 1989-2018 ([figure 2](#)) et les horizons 2030, 2050 et 2080 à partir des données des scénarios d'émissions de GES SSP2-4.5 ([figure 3](#)) et SSP3-7.0 ([figure 4](#)).

Figure 2 Zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Culex pipiens* selon les relevés historiques de températures moyennes saisonnières 1989-2018



La carte indique la zone où les températures moyennes saisonnières pendant la période d'activité du VNO (calculées d'avril à septembre) étaient favorables à la transmission du virus par *Cx. pipiens* au Québec sur la période de 1989-2018, à partir des données de température provenant d'une réanalyse météorologique (figure 2).

Figure 3 Zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Culex pipiens* selon le 50^e percentile des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre SSP2-4.5 pour les horizons 2030, 2050 et 2080

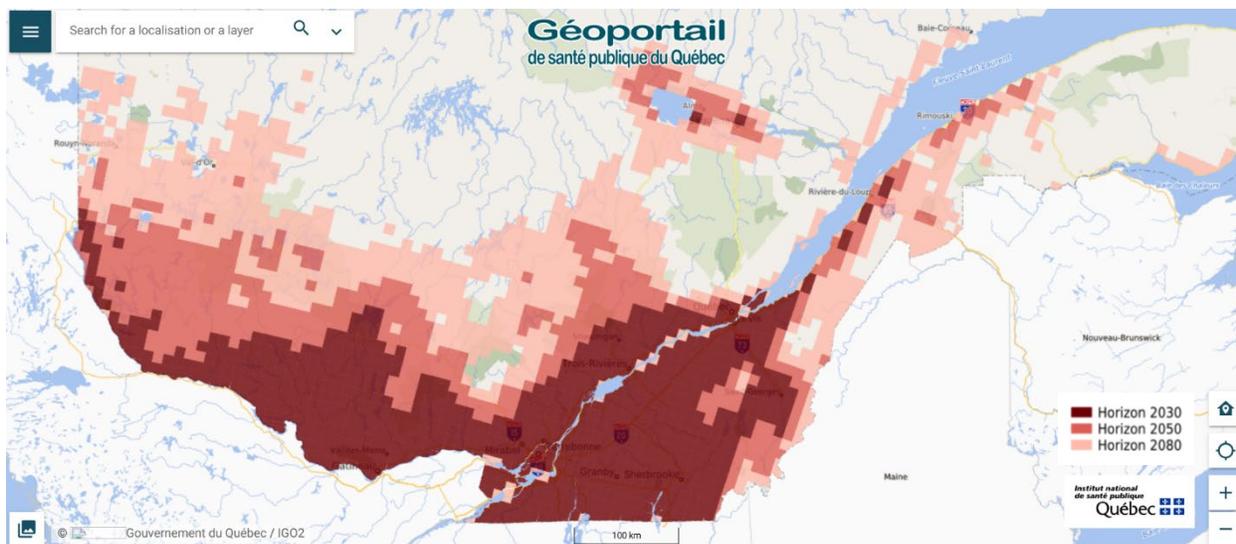
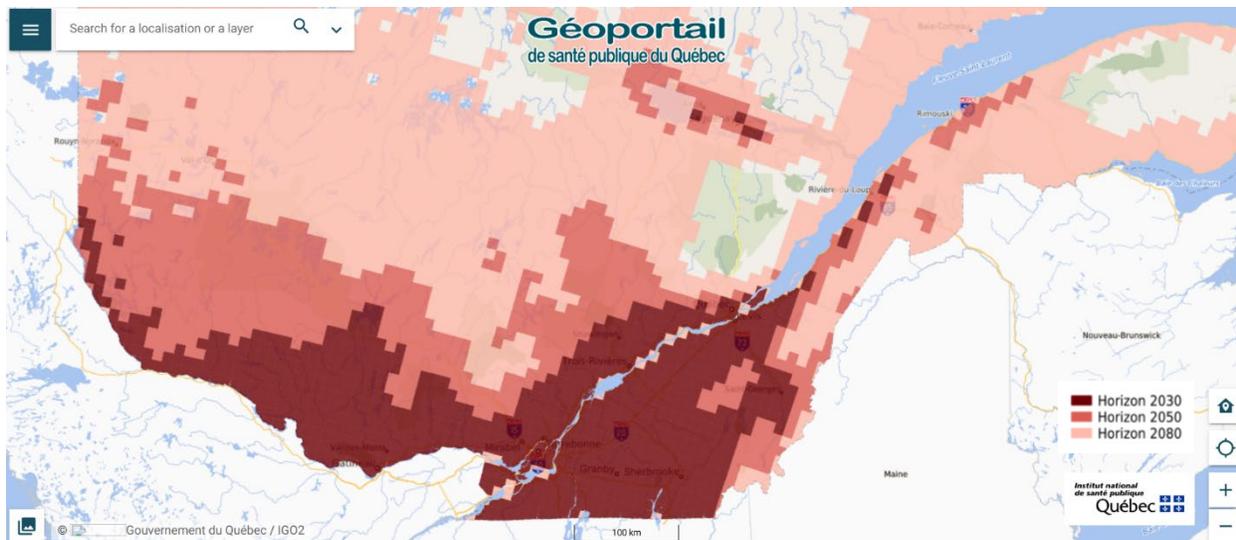


Figure 4 Zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Culex pipiens* selon le 50^e percentile des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre SSP3-7.0 pour les horizons 2030, 2050 et 2080



Les projections climatiques montrent les zones où les températures moyennes saisonnières pendant la période d'activité du VNO (calculées d'avril à septembre) seraient favorables à la transmission du virus par *Cx. pipiens* au Québec pour les horizons 2030 (rouge), 2050 (corail) et 2080 (rose) selon le 50^e percentile des 14 simulations climatiques pour les scénarios d'émissions de GES modérées (SSP2-4.5; [figure 3](#)) et élevées (SSP3-7.0; [figure 4](#)).

La zone climatique favorable à la transmission du VNO, selon les données de la réanalyse de 1989-2018, est comprise dans celle estimée pour l'horizon 2030 dans chacun des scénarios d'émissions de GES. Bien que la zone climatique soit favorable, la transmission du VNO par *Cx. pipiens* dépend d'autres facteurs écologiques et climatiques, ce qui explique pourquoi l'activité du VNO n'est pas présente dans toute la zone favorable pour la période 1989-2018. De plus, il est possible que la présence du VNO soit identifiée en dehors de ces zones en raison des températures plus chaudes observées entre 2019 et 2023 qui n'avaient pas été prises en compte dans la zone climatique favorable à la transmission du virus de 1989-2018.

À l'horizon 2030, la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* couvre la majorité du sud du Québec, de manière similaire pour les deux scénarios d'émissions de GES. Aux horizons 2050 et 2080, la zone progresse de plus en plus vers le nord de la province, avec une étendue plus rapide sous le scénario SSP3-7.0 que sous le scénario SSP2-4.5. Les cartes doivent être interprétées avec prudence en raison des incertitudes liées aux projections climatiques et à l'utilisation du 50^e percentile pour simplifier la lecture des cartes.

3.4 L'utilisation des cartes avec des facteurs d'exposition et de vulnérabilité

3.4.1 Facteurs d'exposition identifiés

Parmi les facteurs d'exposition identifiés dans plusieurs études sur l'épidémiologie du VNO (4,21,35-46), certains ont été retenus pour démontrer leurs utilisations possibles avec les cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens*. Ce croisement pourrait aider à orienter l'identification des zones prioritaires pour le déploiement des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation. Ces facteurs, présentés dans le [tableau 1](#), sont déjà géoréférencés, libres d'accès, faciles à utiliser et à interpréter.

Cette liste ne représente pas l'exhaustivité des facteurs d'exposition. Plutôt, elle propose des exemples de facteurs d'exposition aux utilisateurs qui pourront eux-mêmes superposer leurs propres données géoréférencées selon leurs besoins.

D'autres données géoréférencées (ex. : les magasins ou sites d'entreposage de pneus qui constituent un habitat propice pour les moustiques) sont disponibles sur :

- Géoportail de l'INSPQ (<https://cartes.inspq.qc.ca/geoportail/>);
- Données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/>);
- Gouvernement ouvert (<https://ouvert.canada.ca/fr>);
- Forêt ouverte (<https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>); et
- Statistique Canada (<https://www.statcan.gc.ca/>).

Tableau 1 Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données

Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Distribution de la population humaine	Identifier les zones où des populations humaines sont plus à risque d'exposition au VNO, car elles résident dans des zones où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO	Écoumène de population	La démographie et la population totale ont été identifiées comme un paramètre non climatique important pour l'épidémiologie du VNO (21,37).	Statistique Canada Recensement de la population de 2021 – Fichier des limites – Limites non normalisées : Écoumène de population L'écoumène de population correspond aux zones où des habitants ont établi leur résidence permanente, ce qui correspond aux îlots de diffusion ayant une densité de population minimale d'au moins 0,4 habitant au km ² . https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/geo/sip-pis/boundary-limites/index2021-fra.cfm?year=21 <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>
		Densité de la population	La répartition et la densité de la population humaine ont un effet positif important sur le risque d'infection par le VNO (36,37).	Géoportail de santé publique du Québec <i>Thématique : Aménagements du territoire et des quartiers</i> Recensement de la population 2021 : Densité de la population par aire de diffusion https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/ref/dict/az/Definition-fra.cfm?ID=geo034
		Territoires autochtones	La démographie et la population totale ont été identifiées comme un paramètre non climatique important pour l'épidémiologie du VNO (21,37).	Ressources naturelles Canada Limites législatives des terres autochtones du Canada https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/522b07b9-78e2-4819-b736-ad9208eb1067 <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>

Tableau 1 Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données (suite)

Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Activités humaines professionnelles ou récréatives à risque	Identifier les zones où des populations humaines sont plus à risque d'exposition au VNO, en raison de leurs activités dans des zones où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO	Zones agricoles	Les travailleurs agricoles et les fermiers ont été identifiés comme étant plus à risque d'être infectés par le VNO (35,38).	Commission de protection du territoire agricole Zone agricole du Québec : La zone où le milieu biophysique offre les meilleures caractéristiques pour la pratique des activités agricoles. https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/zone-agricole-du-quebec <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>
		Exploitations forestières	Les travailleurs forestiers ont été identifiés comme étant plus à risque d'être infectés par le VNO (35).	Ministère des Ressources naturelles et des Forêts Subdivisions territoriales forestières (STF) : Territoires forestiers publics, ainsi que les limites territoriales forestières en vigueur au ministère. Les STFs comprennent les limites administratives des unités de gestion, description du mode de gestion, domanialité (publique/privée), limites territoriales des forêts attribuables https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/stf
		Bases militaires	Les travailleurs militaires ont été identifiés comme étant plus à risque d'être infectés par le VNO (35,38).	Commission de toponymie du Québec Toponymes officiels : Noms de lieux officiels du Québec, sauf les odonymes (noms de voies de communication) avec la géolocalisation https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/toponymes-officiels
		Zones de chasse	Les chasseurs ont été identifiés comme étant plus à risque d'être infectés par le VNO (35).	Forêt Ouverte <i>Thématique : Chasse et piégeage</i> Délimitation du Québec en 28 zones, et leurs parties de zones. https://www.quebec.ca/tourisme-et-loisirs/activites-sportives-et-de-plein-air/chasse-sportive/cartes-zones <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>

Tableau 1 Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données (suite)

Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Activités humaines professionnelles ou récréatives à risque	Identifier les zones où des populations humaines sont plus à risque d'exposition au VNO, en raison de leurs activités dans des zones où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO	Fermes agrotouristiques	Les travailleurs agricoles et les fermiers ont été identifiés comme étant plus à risque d'être infectés par le VNO (35,38).	Tourisme Québec Attraits touristiques au Québec : Regroupés sous une quarantaine de catégories, plus de 4 000 attraits touristiques reliés à différents produits et services. Les détails incluant la géolocalisation de chaque ferme agrotouristique sont accessibles sur le Géoportail. https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/attraits-touristiques-au-quebec <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>
		Campings	Les personnes ayant un emploi ou pratiquant des activités impliquant une exposition prolongée à l'extérieur dans des zones endémiques présentent un risque plus élevé d'exposition au VNO (38).	Tourisme Québec Établissements d'hébergement touristique du Québec : Plus de 14 000 établissements d'hébergements de plusieurs catégories. Les détails incluant la géolocalisation de chaque terrain de camping sont accessibles sur le Géoportail. https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/etablissements-d-hebergement-touristique-au-quebec <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>

Tableau 1 Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données (suite)

Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Activités humaines professionnelles ou récréatives à risque	Identifier les zones où des populations humaines sont plus à risque d'exposition au VNO, en raison de leurs activités dans des zones où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO	Territoires récréatifs	Les personnes ayant un emploi ou pratiquant des activités impliquant une exposition prolongée à l'extérieur dans des zones endémiques présentent un risque plus élevé d'exposition au VNO (38).	Ministère des Ressources naturelles et des Forêts Territoires récréatifs du Québec : Aires fauniques communautaires (AFC); ententes particulières avec les autochtones; petits lacs aménagés (PLA); pourvoies avec droits exclusifs; territoires exclusifs de chasse; réserves fauniques; zones d'exploitation contrôlée (zecs); parcs nationaux du Québec; et du Canada; parcs régionaux; parcs marins; réserves écologiques; refuges fauniques; refuges d'oiseaux migrateurs (ROM); réserves nationales de faune; forêt d'enseignement et de recherche de Montmorency; Station forestière de Duchesnay. https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/couche-des-territoires-recreatifs-du-quebec-a-l-echelle-de-1-100-000
		Bases de plein air	Les travailleurs des loisirs en extérieur ont été identifiés comme étant plus à risque d'être infectés par le VNO (38).	Commission de toponymie du Québec Toponymes officiels : Noms de lieux officiels du Québec, sauf les odonymes (noms de voies de communication) avec la géolocalisation https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/toponymes-officiels <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>
		Pistes cyclables (Route Verte) Chemins forestiers	Les personnes ayant un emploi ou pratiquant des activités impliquant une exposition prolongée à l'extérieur dans des zones endémiques présentent un risque plus élevé d'exposition au VNO (38).	Ministère des Ressources naturelles et des Forêts Adresses Québec : Réseau de transport - pistes cyclables de la Route Verte et chemins multiusages étant un chemin en milieu forestier construit ou utilisé à des fins multiples https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/adresses-quebec <i>Ces facteurs sont aussi accessibles sur le Géoportail.</i>

Tableau 1 Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données (suite)

Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Distribution des hôtes animaux	Identifier les zones où des hôtes aviaires et mammifères sont plus à risque d'exposition au VNO, car ils résident dans des zones où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO	Distribution des oiseaux réservoirs	L'abondance des corneilles d'Amérique était positivement corrélée avec les cas humains de VNO en Ontario, Canada (39). De plus, plusieurs espèces d'oiseaux agissent en tant qu'hôtes réservoirs qui contribuent à la circulation du VNO au Québec comme l'étourneau sansonnet, le merle d'Amérique, le bruant chanteur et le moineau domestique (4).	<p>NatureCounts Atlas des oiseaux nicheurs du Québec : Données de présence et reproduction avec la possibilité de spécifier l'espèce. Trois visualisations de cartes par espèce est possibles : (1) présence et reproduction (2) nombre d'enregistrements et (3) tendances démographiques. https://naturecounts.ca/nc/default/explore.jsp#download</p> <p>eBird eBird : Données en temps réel sur l'abondance et la distribution des oiseaux qui peuvent être explorées par espèce ou par géographie (ex. : régions, réserves nationales de faune, Zones importantes pour la conservation des oiseaux, Zones clés pour la biodiversité). https://ebird.org/explore</p>
		Centres équestres	Les chevaux sont fréquemment des hôtes accidentels du VNO, avec 8 à 10 % des chevaux infectés présentant des signes neurologiques de la maladie. Les risques de mortalité signalés chez les chevaux atteints cliniquement par le VNO varient de 22 à 44 % (40).	<p>Tourisme Québec Attrait touristiques au Québec : Regroupés sous une quarantaine de catégories, plus de 4 000 attraits touristiques reliés à différents produits et services. Les détails incluant la géolocalisation de chaque centre équestre sont accessibles sur le Géoportail. https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/attraits-touristiques-au-quebec <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i></p>
		Élevage de volaille	Les volailles domestiques sont généralement moins sensibles au VNO que les autres espèces aviaires, mais quelques oies et canards peuvent développer une maladie mortelle (4).	<p>Registres des entreprises du Québec Élevages du bétail et de la volaille : Plusieurs catégories associées avec différent type d'élevage. Les détails incluant la géolocalisation de chaque éleveur sont accessibles sur le Géoportail. https://www.quebec.ca/entreprises-et-travailleurs-autonomes <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i></p>

Tableau 1 Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données (suite)

Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Habitat et écologie favorables aux vecteurs	Identifier les zones où des populations humaines et des hôtes animaux sont plus à risque d'exposition au VNO, car le type d'habitat et l'écologie sont favorables à la survie et au développement des moustiques	Pourcentage des logements construits avant 1960	Un effet positif important a été constaté entre la proportion de logements anciens et le risque de contracter le VNO (36,37). Les maisons anciennes sont souvent liées à des infrastructures âgées (ex. : fissures dans les fondations et les trottoirs, fosses septiques et égouts endommagés) (41).	Géoportail de santé publique du Québec <i>Thématique : Logement</i> Recensement de la population de 2021 : Proportion de logements privés selon la période de construction de 1960 ou avant par aire de diffusion https://cartes.inspq.qc.ca/fiches/Geoportail_FS_StatsCan_logement_periode.pdf
		Densité lumineuse (notamment en zone urbaine)	Des proportions plus élevées d'intensité lumineuse urbaine augmentent la probabilité d'observer un cas humain de VNO (37). La pollution lumineuse causée par l'éclairage artificiel nocturne perturbe considérablement les activités des moustiques, y compris l'inhibition de l'entrée en diapause chez <i>Cx. pipiens</i> (42).	Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) Système d'imagerie visible et infrarouge (de l'anglais Visible and Infrared Imaging Suite ou VIIRS) : L'éclairage nocturne sur l'échelle globale utilisant la bande Jour-Nuit obtenue par le satellite Suomi NPP (produit VNP46A1) https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/VNP46A1/ L'imagerie des données quotidiennes à une résolution de 500 mètres est accessible ici : https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/view-data/#@0,0,0,3,0z
		Infrastructures de drainage	Les tuyaux d'égouts pluviaux sont des refuges constants pour les <i>Culex</i> (43). Les infrastructures d'eaux pluviales et d'eaux usées créées par l'humain constituent des habitats très répandus pour les moustiques immatures dans les environnements urbains et suburbains (44).	Ministère des Transports et de la Mobilité durable Élément de drainage : Localisation linéaire des conduites de drainage sous la responsabilité du ministère. L'élément d'inventaire est décrit de type transversal ou tuyau de raccordement au fossé, dont le diamètre a plus de 30 cm et moins de 3 m. https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/element-de-drainage

Tableau 1 Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données (suite)

Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Habitat et écologie favorables aux vecteurs	Identifier les zones où des populations humaines et des hôtes animaux sont plus à risque d'exposition au VNO, car le type d'habitat et l'écologie sont favorables à la survie et au développement des moustiques	Systèmes d'assainissement des eaux usées	Les tuyaux d'égouts pluviaux sont des refuges constants pour les <i>Culex</i> (43). Les infrastructures d'eaux pluviales et d'eaux usées créées par l'humain constituent des habitats très répandus pour les moustiques immatures dans les environnements urbains et suburbains (44).	Environnement et Changement climatique Canada Types de traitement des systèmes d'assainissement des eaux usées au Canada : Les emplacements des systèmes d'assainissement des eaux usées au Canada et les types de traitement utilisés (mécanique, étang ou aucun traitement) https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/29ba2628-b6c5-4dda-8cfb-fca9852925a9
		Parcs et jardins publics (notamment en zone urbaine)	Les espaces végétalisés des zones urbaines constituent généralement l'utilisation du sol la plus importante pour <i>Cx. pipiens/restuans</i> , avec l'indice de pertinence de l'habitat le plus élevé dans ces zones où la végétation et les bâtiments se côtoient (45,46).	Commission de toponymie du Québec Toponymes officiels : Noms de lieux officiels du Québec, sauf les odonymes (noms de voies de communication) avec la géolocalisation https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/toponymes-officiels <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>
		Saturation en eau de la surface du sol	Les sols mal ou imparfaitement drainés conviennent mieux à l'habitat que les sols modérément ou bien drainés, car ces zones peuvent créer des sites de reproduction temporaires pour les vecteurs (45).	Agriculture et Agroalimentaire Canada Pourcentage de saturation en eau de la surface du sol : L'humidité volumique du sol pour la couche superficielle (< 5 cm). Les données sont collectées quotidiennement, et la moyenne est calculée pour la semaine et le mois. https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/c0ea8c27-e62e-45bc-b64c-d475650d84a2

Tableau 1 Facteurs d'exposition sélectionnés et sources de données (suite)

Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Habitat et écologie favorables aux vecteurs	Identifier les zones où des populations humaines et des hôtes animaux sont plus à risque d'exposition au VNO, car le type d'habitat et l'écologie sont favorables à la survie et au développement des moustiques	Écozone terrestre	Les analyses effectuées dans le cadre de ce projet ont révélé que les lots de Cx. <i>pipiens/restuans</i> provenant des plaines à forêts mixtes au Québec avaient une probabilité plus élevée d'être positifs au VNO que les lots de moustiques provenant du bouclier boréal.	Ministère des Ressources naturelles et des Forêts Classification écologique du territoire québécois : Cartographie et description d'unités écologiques dans un système à neuf niveaux de perception entre l'échelle continentale et celle du paysage. Les données de sous-zones de végétation sont synonymes d'écozones terrestres (ex. : sous-zone de la forêt décidue, forêt mixte et forêt boréale). https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/systeme-hierarchique-de-classification-ecologique-du-territoire <i>Ce facteur est aussi accessible sur le Géoportail.</i>

3.4.2 Facteurs de vulnérabilité identifiés

Parmi les facteurs de vulnérabilité identifiés dans les études de Montgomery et Murray 2015 (47) et Sutinen et coll. 2022 (48), deux ont été retenus pour illustrer leurs utilisations possibles avec les cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens*. Ce croisement pourrait identifier des zones où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation devraient être prioritairement déployées. Ces facteurs, présentés dans le [tableau 2](#), sont déjà géoréférencés, accessibles et facilement utilisables. Cependant, cette liste ne représente pas toutes formes de facteurs de vulnérabilité.

3.4.3 Utilisation des cartes du virus du Nil occidental avec les facteurs d'exposition et de vulnérabilité

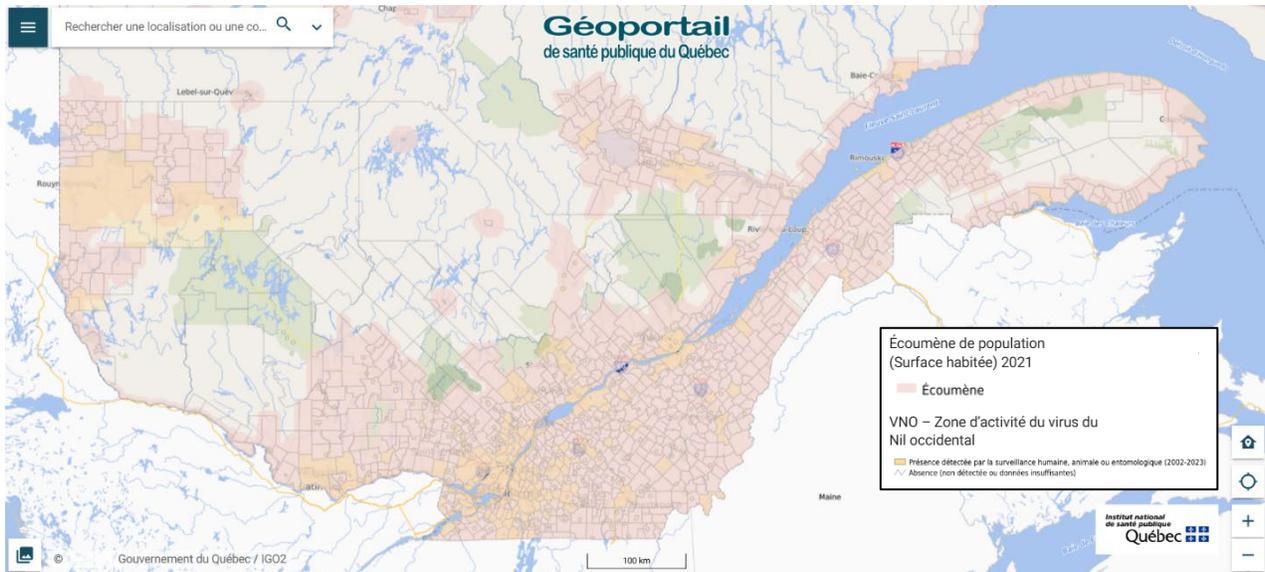
Le croisement de la zone d'activité du VNO avec les facteurs d'exposition ([tableau 1](#)) et de vulnérabilité ([tableau 2](#)) mettra en évidence le territoire où la mise en place des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourrait aider à diminuer les fardeaux actuels du VNO. De plus, un croisement de ces facteurs pourrait être appliqué avec la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* pour anticiper les possibles mesures d'adaptation dans les prochaines années. Le croisement de ces données est réalisable directement dans le Géoportail ou avec un logiciel système d'information géographique comme QGIS.

Les cartes ci-dessous montrent le croisement de la zone d'activité du VNO, selon les données de surveillance de 2002 à 2023, avec l'écoumène de population correspondant à la zone habitée du Québec ([figure 5](#)) ainsi que la localisation des centres équestres ([figure 6](#)).

Tableau 2 Facteurs de vulnérabilité sélectionnés et sources des données

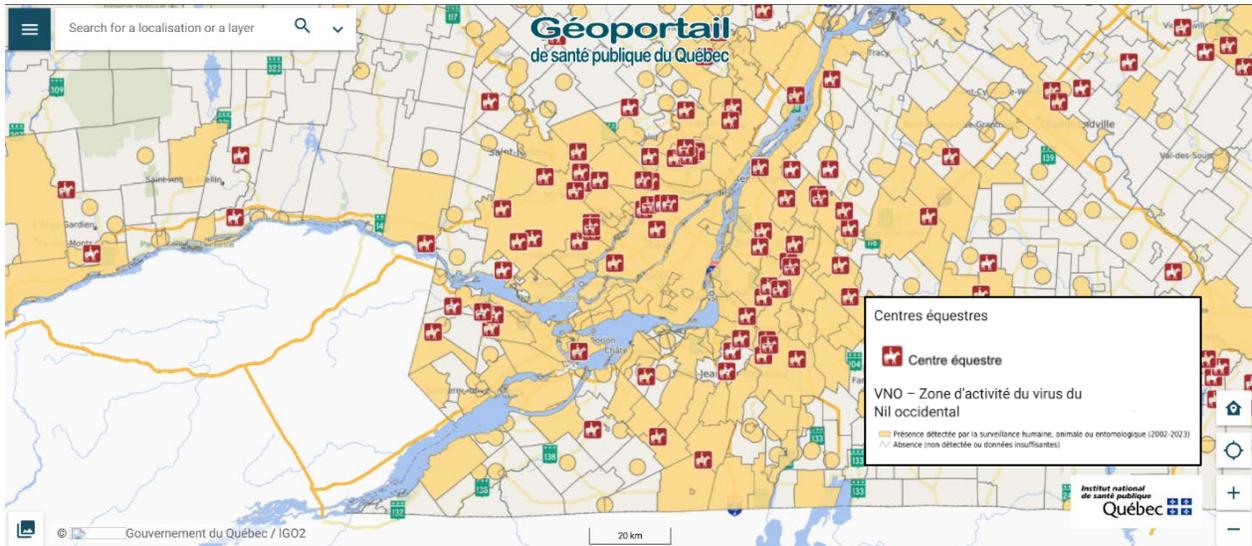
Catégories	Objectifs	Facteurs	Relations de la littérature	Exemples de données disponibles
Sous-groupes vulnérables de la population humaine	Identifier les zones où des sous-groupes de population humaine sont plus vulnérables, car elles résident dans des zones où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO et peuvent développer des formes plus sévères de l'infection	Pourcentage de la population de 65 ans ou plus	Les personnes de 50 ans et plus sont à plus grand risque de développer des formes sévères du VNO (47,48).	<p>Géoportail de santé publique du Québec <i>Thématique : Caractéristiques sociodémographiques</i> Recensement de la population de 2021 : Proportion des personnes de 65 ans et plus sur la population totale par aire de diffusion. La tranche d'âge des 65 ans et plus constitue le meilleur indicateur actuellement disponible sur le Géoportail. https://cartes.inspq.qc.ca/fiches/Geoportail_FS_StatsCa_n_AgeSexePopulation.pdf</p> <p>Les données sur l'âge de la population au Canada, issus du recensement de 2021 et disponibles au niveau des aires de diffusion, proviennent de Statistique Canada et sont accessibles ici sous forme de couche géomatique fournie par Esri Canada : https://services.arcgis.com/wjcPoefzjzCgffS/arcgis/rest/services/Canadian_Age_and_Gender_2021/FeatureServer</p>
		Prévalence de la multimorbidité	Les personnes atteintes des comorbidités, comme le cancer, le diabète ou les maladies cardiovasculaires, sont à plus grand risque de développer des formes sévères de l'infection par le VNO (47,48).	<p>Géoportail de santé publique du Québec <i>Thématique : Santé</i> Système intégré de surveillance des maladies chroniques du Québec : Proportion d'individus âgés de 25 ans et plus en état de multimorbidité (au moins 2 maladies chroniques) ou de multimorbidité complexe (au moins 3 maladies chroniques) par aire de diffusion https://cartes.inspq.qc.ca/fiches/Geoportail_FS_SISMA_CQ_Multimorbidite.pdf</p>

Figure 5 Zone d'activité du VNO au Québec, selon les données de surveillance 2002-2023, et l'écoumène de la population en 2021



La superposition de la zone d'activité du VNO avec l'écoumène de population met en évidence le territoire habité où les populations humaines ont une probabilité plus élevée de contracter une infection. Plus précisément, il en ressort que la majorité de la zone d'activité du VNO se situe dans l'écoumène de population au Québec. Des interventions à différents niveaux (c.-à-d. individuel ou populationnel) pourraient être envisagées pour limiter l'infection par le VNO chez les humains.

Figure 6 Zone d'activité du VNO au Québec, selon les données de surveillance 2002-2023, et les centres équestres



Le croisement des couches géomatiques met en lumière les centres équestres situés dans la zone d'activité du VNO, où les chevaux ont une probabilité plus élevée de contracter le virus. Les propriétaires des centres équestres pourraient déployer des interventions contribuant à limiter l'infection par le VNO chez les chevaux.

4 DISCUSSION

Les cartes développées dans le cadre de ce projet présentent la zone d'activité du VNO et permettent d'identifier la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens* aux horizons 2030, 2050 et 2080 en contexte de changements climatiques. Ces cartes sont destinées à différents intervenants responsables des appréciations de risques et de développement des plans d'adaptation aux changements climatiques incluant les intervenants en santé publique, les décideurs ministériels et d'autres organismes gouvernementaux, les municipalités et d'autres organismes municipaux, les établissements d'enseignement et de la recherche, les entreprises, les organismes à but non lucratif et les citoyens.

La disponibilité des cartes sur le Géoportail favorise leur utilisation et appropriation par les différents publics cibles. Le croisement de ces cartes avec des facteurs d'exposition et de vulnérabilité reliés à la population humaine, aux hôtes animaux et aux moustiques permet de mettre en évidence des zones ayant une probabilité plus élevée de présence pour le VNO et où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourraient être ciblées prioritairement. Les utilisateurs peuvent également recenser et superposer des facteurs additionnels directement dans le Géoportail avec les cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus. De plus, les données peuvent être téléchargées et importées dans un logiciel système d'information géographique comme QGIS.

4.1 Interprétation et limites des cartes

4.1.1 Zone d'activité du virus du Nil occidental

La première carte montre la zone d'activité du VNO au Québec à partir des données de surveillance de 2002 à 2023. Cette zone indique où il y a une probabilité plus élevée de présence du virus sur le territoire, à partir des données historiques de la surveillance humaine, animale et entomologique. Toutefois, il est difficile de prédire la circulation virale dans l'espace et dans le temps étant donné la nature cyclique de la présence et de l'intensité du VNO.

La carte met en évidence la zone d'activité du VNO en agrégeant les cas humains, les cas animaux et les lots de moustiques porteurs du virus. Cette agrégation, utilisant deux échelles géographiques, ne permet pas d'identifier précisément la localisation ni l'intensité de la circulation virale sur le territoire. La détection du virus n'est pas uniforme à l'intérieur de la zone d'activité en raison de la variabilité de la présence et des déplacements de moustiques et d'animaux infectés dans l'environnement. De plus, l'absence d'activité du VNO en dehors de cette zone ne doit pas être interprétée comme une absence de risque d'exposition au virus, puisque les oiseaux et les moustiques infectés peuvent se déplacer sur des distances variables (4,19,50).

L'identification de la zone d'activité du VNO dépend aussi fortement de la variabilité des données de surveillance dans l'espace et dans le temps, ce qui pourrait entraîner des biais de représentation.

- D'abord, la surveillance intégrée dépend de la densité et de la distribution (ou l'écoumène) de la population. Plus spécifiquement, les zones urbaines sont plus échantillonnées pour tous les volets de surveillance que les zones suburbaines et rurales. En conséquence, la collecte des données n'est pas uniforme sur tout le territoire, ce qui fait que la présence du VNO pourrait ne pas être repérée dans certains secteurs.
- En second lieu, environ 70 à 80 % des humains infectés avec le VNO sont asymptomatiques (51,52). Les données de la surveillance humaine incluent les cas asymptomatiques détectés par Héma-Québec. Toutefois, les cas asymptomatiques ou non neuro invasifs sont plus susceptibles d'être sous-déclarés que les cas neuro invasifs. Par conséquent, la zone représentant les cas humains de VNO peut être une sous-représentation de l'étendue géographique réelle dans la population.
- Troisièmement, la surveillance entomologique a été limitée dans l'espace et dans le temps en lien avec les ressources nécessaires à la collecte de moustiques sur le terrain. Les régions ciblées par la surveillance entomologique provinciale ont changé au fil des années. D'autre part, cette surveillance provinciale a été suspendue de 2007 à 2012 inclusivement et interrompue de nouveau en 2022 (1), ce qui a entraîné un bris de continuité dans les données. Plus spécifiquement, aucune analyse de détection par PCR du VNO n'a pu être complétée sur les lots de moustiques de 2007 à 2009, ce qui peut limiter les interprétations.

4.1.2 Projections de la zone climatique favorable à la transmission du virus du Nil occidental par *Culex pipiens*

Les projections climatiques illustrent les zones où la température sera probablement favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* aux horizons 2030, 2050 et 2080, selon deux scénarios d'émissions de GES (SSP2-4.5 et SSP3-7.0). Ces projections sont des représentations de ce que le climat pourrait être dans les prochaines décennies. Les trois principales sources d'incertitudes des projections climatiques sont la variabilité naturelle interne du climat, les incertitudes liées à la complexité des modèles climatiques et celles liées aux scénarios d'émissions qui dépendent des choix de société qui seront faits (30). Ces sources d'incertitudes rendent difficile la détermination exacte des changements dans l'espace et dans le temps.

Seules les limites thermiques favorables à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* (l'un des principaux vecteurs) ont été prises en compte pour le calcul de la zone climatique favorable au Québec, ce qui représente les températures nécessaires pour la survie de ce vecteur et la réplication du virus. Cependant, il existe d'autres vecteurs potentiels du virus au Québec, comme *Culex restuans*, *Aedes vexans* et *Coquillettidia perturbans*, dont les conditions thermiques favorables nécessaires à leur transmission du VNO ne sont pas clairement définies. Il est ainsi possible que la zone climatique réelle de transmission du VNO au Québec soit plus étendue que celles représentées sur les cartes.

De plus, la transmission du VNO chez l'humain n'est pas systématique dans une zone climatique favorable, car un individu doit être exposé à un moustique infecté pour contracter le virus. D'autres facteurs climatiques et écologiques que ceux pris en compte dans ces projections

peuvent influencer la circulation virale et la transmission du VNO par *Cx. pipiens*. Par exemple, le climat doit être favorable à la survie et le développement des moustiques (ex. : les précipitations), les habitats doivent être propices à la reproduction et au développement des vecteurs et des hôtes (ex. : l'utilisation du sol et la proximité des eaux stagnantes) et les hôtes réservoirs doivent être présents pour infecter les vecteurs (ex. : les oiseaux réservoirs). L'ajout de ces facteurs aux projections permettrait d'affiner la zone probable de la transmission du VNO par *Cx. pipiens* dans les prochaines années.

4.1.3 Ajout de facteurs d'exposition et de vulnérabilité

Le croisement des facteurs d'exposition et de vulnérabilité avec les cartes de la zone d'activité du VNO et de la zone climatique favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens* permet d'affiner l'analyse pour visualiser des territoires où il y a une probabilité plus élevée de présence et de transmission du virus. Ceci permet de visualiser facilement les territoires qui sont simultanément touchés par les différentes couches (ex. : la présence du VNO ainsi que des facteurs d'exposition et de vulnérabilité). L'utilisateur peut également créer son propre indicateur en intégrant les différents jeux de données selon leur objectif.

Le croisement de la zone d'activité du VNO avec l'écoumène de population pourrait aider à orienter les communications de la santé publique en précisant des interventions de niveaux individuel ou populationnel à mettre en place afin de réduire les infections du VNO chez les humains. Quelques interventions peuvent être mises en place à différentes échelles géographiques afin de réduire le nombre de moustiques dans l'environnement. Par exemple, les interventions peuvent inclure la vidange de l'eau stagnante des contenants, le nettoyage des gouttières, l'entretien des piscines ou l'utilisation de larvicides dans les gîtes larvaires (53). Chaque individu peut également se protéger en utilisant un chasse-moustique et en portant de vêtements longs de couleurs claires à l'extérieur (53).

De la même manière, le croisement de la zone d'activité du VNO avec les centres équestres pourrait permettre de déterminer différentes interventions à déployer afin de limiter l'infection du VNO chez les chevaux. Quelques exemples qui pourraient être mis en place par les propriétaires des centres équestres incluent la vaccination des chevaux chaque printemps, l'installation de moustiquaires dans l'écurie et la vidange plus fréquente des abreuvoirs et des bacs remplis d'eau à l'extérieur (15,53).

Cependant, la liste des facteurs d'exposition et de vulnérabilité n'est pas exhaustive. De plus, les facteurs ne sont disponibles que pour la période contemporaine, mais ils peuvent servir de base pour identifier les zones où des interventions de santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pourraient être prioritairement déployées dans les prochaines années.

5 CONCLUSION

Jusqu'à présent, aucune carte de distribution à portée provinciale du VNO n'avait été publiée au Québec. En conséquence, ce projet avait pour objectif de développer des cartes de répartition de VNO au Québec pour soutenir la planification et la prise de décision des autorités de santé publique, des décideurs ministériels et d'autres acteurs de l'adaptation. Il présente pour la première fois une carte de la zone d'activité du VNO sur le territoire québécois à partir des données de surveillance du virus. De plus, des projections de la zone climatique favorable à la transmission du VNO par *Cx. pipiens* (l'un des principaux vecteurs du virus) ont été générées pour les horizons 2030, 2050 et 2080 sous les scénarios d'émissions de GES modérées (SSP2-4.5) et élevées (SSP3-7.0). Ces cartes informeront différents publics sur la zone où il y a une probabilité plus élevée de présence du VNO au Québec et la zone où le climat pourrait être favorable à la transmission du virus par *Cx. pipiens* dans le futur.

Plusieurs facteurs d'exposition et de vulnérabilité ont été identifiés et classés en cinq catégories : la distribution de la population humaine, les activités professionnelles ou récréatives à risque, la distribution des hôtes animaux, l'écologie favorable aux moustiques et les sous-groupes vulnérables de la population humaine. L'ajout de différents facteurs d'exposition et de vulnérabilité aux cartes permettra d'orienter la mise en place des interventions en santé publique ou d'autres mesures d'adaptation pour réduire les fardeaux actuels et futurs du VNO. Les futures cartographies du VNO pourraient envisager d'inclure d'autres facteurs climatiques (ex. : les précipitations), d'autres vecteurs du virus ainsi que des facteurs liés aux hôtes réservoirs, afin de prédire avec plus de précision la distribution et la transmission du virus au Québec.

6 RÉFÉRENCES

- 1 Ministère de la Santé et des Services sociaux. Virus du Nil occidental (VNO) [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/zoonoses/virus-du-nil-occidental-vno/description/>
- 2 Ouhoummane N, Ducrocq J, Irace-Cima A. Portrait de l'infection par le virus du Nil occidental au Québec : 2003-2018 [Internet]. Institut national de santé publique du Québec; 2021. Repéré à : <https://www.inspq.qc.ca/publications/2809>
- 3 Rochlin I, Faraji A, Healy K, Andreadis TG. West Nile virus mosquito vectors in North America. *Journal of Medical Entomology*. 2019;56(6):1475–90. <https://doi.org/10.1093/jme/tjz146>
- 4 Taieb L, Ludwig A, Ogden NH, Lindsay RL, Iranpour M, Gagnon CA, et coll. Bird species involved in West Nile Virus epidemiological cycle in southern Québec. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(12):4517. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124517>
- 5 Ludwig A, Rousseu F, Kotchi SO, Allostry J, Fournier RA. Mapping the abundance of endemic mosquito-borne diseases vectors in southern Quebec. *BMC Public Health*. 2023;23(1):924. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-15773-x>
- 6 Rocheleau JP, Michel P, Lindsay LR, Drebot M, Dibernardo A, Ogden NH, et coll. Emerging arboviruses in Quebec, Canada: assessing public health risk by serology in humans, horses and pet dogs. *Epidemiology & Infection*. 2017;145(14):2940–48. <https://doi.org/10.1017/S0950268817002205>
- 7 Root J, Bosco-Lauth AM. West nile virus associations in wild mammals: An update. *Viruses*. 2019;11(5):459. <https://doi.org/10.3390/v11050459>
- 8 Ludwig A, Zheng H, Vrbova L, Drebot M, Iranpour M, Lindsay L. Increased risk of endemic mosquito-borne diseases in Canada due to climate change. *Canada Communicable Disease Report*. 2019;45(4):90–7. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v45i04a03>
- 9 Public Health Ontario. West Nile virus surveillance [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.publichealthontario.ca/en/Data-and-Analysis/Infectious-Disease/West-Nile-Virus>
- 10 Province of Manitoba. Manitoba West Nile virus Update [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.gov.mb.ca/health/wnv/update.html>
- 11 Government of Saskatchewan. West Nile virus risk level and surveillance results [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.saskatchewan.ca/residents/health/diseases-and-conditions/west-nile-virus/west-nile-virus-risk-level-and-surveillance-results>
- 12 BC Centre for Disease Control. Surveillance [Internet]. 2024. Repéré à : <http://www.bccdc.ca/health-info/diseases-conditions/west-nile-virus-wnv/surveillance>
- 13 Gouvernement du Canada. Maladies transmises par les moustiques : Mise à jour saisonnière [Internet]. 2024. Repéré à : <https://sante-infobase.canada.ca/zoonoses/moustique/>
- 14 U.S. Centers for Disease Control and Prevention. Data and maps for West Nile [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.cdc.gov/west-nile-virus/data-maps/index.html>
- 15 Gouvernement du Québec. Virus du Nil occidental chez les animaux [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/sante-animale/maladies-animales/liste-maladies-animales/virus-nil-occidental-animaux>

- 16 Centre québécois sur la santé des animaux sauvages. Centre québécois sur la santé des animaux sauvages [Internet]. 2024. Repéré à : <https://recherche.umontreal.ca/unite-de-recherche/is/ur14141/>
- 17 Gouvernement du Canada. Virus du Nil occidental : surveillance [Internet]. 2022. Repéré à : <https://inspection.canada.ca/fr/sante-animaux/animaux-terrestres/maladies/notification-immEDIATE/virus-du-nil-occidental/surveillance>
- 18 GDG Environnement. Surveillance et prévention des maladies infectieuses (VNO, EEE, Lyme, Zika) [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.gdg.ca/service/surveillance-et-prevention/>
- 19 García-Carrasco JM, Muñoz AR, Olivero J, Figuerola J, Fa JE, Real R. Gone (and spread) with the birds: Can chorotype analysis highlight the spread of West Nile virus within the Afro-Palaeartic flyway? *One Health*. 2023;17:100585. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2023.100585>
- 20 Ciota AT, Drummond CL, Ruby MA, Drobnack J, Ebel GD, Kramer LD. Dispersal of *Culex* mosquitoes (Diptera: Culicidae) from a wastewater treatment facility. *Journal of Medical Entomology*. 2012;49(1):35–42. <https://doi.org/10.1603/me11077>
- 21 Forest-Bérard, K. Utilisation d'indicateurs météorologiques de la présence de vecteurs du virus du Nil occidental (VNO) [Internet]. Institut national de santé publique du Québec; 2019. Repéré à : <https://www.inspq.qc.ca/publications/2537>
- 22 Shocket MS, Verwillow AB, Numazu MG, Slamani H, Cohen JM, El Moustaid F, et coll. Transmission of West Nile and five other temperate mosquito-borne viruses peaks at temperatures between 23°C and 26°C. *eLife*. 2020;9:e58511. <https://doi.org/10.7554/eLife.58511>
- 23 Di Pol G, Crotta M, Taylor RA. Modelling the temperature suitability for the risk of West Nile Virus establishment in European *Culex pipiens* populations. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2022;69(5). <https://doi.org/10.1111/tbed.14513>
- 24 Dohm DJ, O'Guinn ML, Turell MJ. Effect of environmental temperature on the ability of *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) to transmit West Nile virus. *Journal of Medical Entomology*. 2002;39(1):221–5. <https://doi.org/10.1603/0022-2585-39.1.221>
- 25 Kilpatrick AM, Meola MA, Moudy RM, Kramer LD. Temperature, viral genetics, and the transmission of West Nile virus by *Culex pipiens* mosquitoes. *PLoS Pathogens*. 2008;4(6):e1000092. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1000092>
- 26 Ruiz MO, Chaves LF, Hamer GL, Sun T, Brown WM, Walker ED, et al. Local impact of temperature and precipitation on West Nile virus infection in *Culex* species mosquitoes in northeast Illinois, USA. *Parasites & Vectors*. 2010;3(1):19. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-3-19>
- 27 Thornton MM, Shrestha R, Wei Y, Thornton PE, Kao S, Wilson BE. 2022. Daymet: Monthly Climate Summaries on a 1-km Grid for North America, Version 4 R1. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA [Internet]. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2131>
- 28 Ouranos - Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Température : Changements projetés [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.ouranos.ca/fr/phenomenes-climatiques/temperatures-changements-projetes>
- 29 Venables M, Ripley B. *Modern Applied Statistics with S* [Internet]. 2002. Repéré à : <https://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>

- 30 Ouranos - Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Guide de recommandations scientifiques [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.ouranos.ca/fr/guide-de-recommandations-scientifiques>
- 31 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. 1st ed. Cambridge University Press; 2023. Repéré à : <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009325844/type/book>
- 32 Ouranos - Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Les modèles climatiques [Internet]. 2024. Repéré à : <https://www.ouranos.ca/fr/science-du-climat-modelisation-climatique>
- 33 Lavoie J, Bourgault P, Smith TJ, et coll. An ensemble of bias-adjusted CMIP6 climate simulations based on a high-resolution North American reanalysis. *Scientific Data*. 2024;11: 64. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02855-z>
- 34 Gasset N, Fortin V, Dimitrijevic M, Carrera M, Bilodeau B, Muncaster R, et coll. A 10km North American precipitation and land-surface reanalysis based on the GEM atmospheric model. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2021;25(9):4917–45. <https://doi.org/10.5194/hess-25-4917-2021>
- 35 Drapeau LM, Adam-Poupart A, Irace-Cima A, Tissot F, Germain G, Soto J, et coll. Zoonoses en milieu professionnel : portrait des vulnérabilités et identification des besoins au Québec [Internet]. Institut national de santé publique du Québec; 2021. Repéré à : <https://www.inspq.qc.ca/publications/2761>
- 36 Talbot B, Ardis M, Kulkarni MA. Influence of demography, land use, and urban form on West Nile virus risk and human West Nile virus incidence in Ottawa, Canada. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*. 2019;19(7):533–9. <https://doi.org/10.1089/vbz.2018.2366>
- 37 Karki S, Brown WM, Uelmen J, Ruiz MO, Smith RL. The drivers of West Nile virus human illness in the Chicago, Illinois, USA area: Fine scale dynamic effects of weather, mosquito infection, social, and biological conditions. *PLOS One*. 2020;15(5):e0227160. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227160>
- 38 Odigie AE, Stufano A, Schino V, Zarea AAK, Ndiana LA, Mrenoshki D, et coll. West Nile virus infection in occupational settings - a systematic review. *Pathogens*. 2024;13(2):157. <https://doi.org/10.3390/pathogens13020157>
- 39 Albrecht L, Kaufeld KA. Investigating the impact of environmental factors on West Nile virus human case prediction in Ontario, Canada. *Frontiers in Public Health*. 2023;11:1100543. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1100543>
- 40 Levasseur A, Arsenaault J, Paré J. Surveillance of West Nile virus in horses in Canada: A retrospective study of cases reported to the Canadian Food Inspection Agency from 2003 to 2019. *Can Vet J*. 2021;62(5):469–76.
- 41 Lockaby G, Noori N, Morse W, Zipperer W, Kalin L, Governo R, et coll. Climatic, ecological, and socioeconomic factors associated with West Nile virus incidence in Atlanta, Georgia, U.S.A. *Journal of Vector Ecology*. 2016;41(2):232–43. <https://doi.org/10.1111/jvec.12218>
- 42 Wolkoff M, Fyie L, Meuti M. Light pollution disrupts seasonal differences in the daily activity and metabolic profiles of the northern house mosquito, *Culex pipiens*. *Insects*. 2023;14(1):64. <https://doi.org/10.3390/insects14010064>

- 43 Irwin P, Harbison JE. Year-round observations of adult *Culex* mosquitoes in storm sewer pipes in the Northwestern Chicago suburbs. *Journal of the American Mosquito Control Association*. 2024;40(1):78–80. <https://doi.org/10.2987/23-7159>
- 44 Marini AG, Lieberthal BA, Gardner AM. Production of *Culex pipiens* in stormwater and combined sewer catch basins. *Journal of the American Mosquito Control Association*. 2020;36(4):249–52. <https://doi.org/10.2987/20-6934.1>
- 45 Moua Y, Kotchi SO, Ludwig A, Brazeau S. Mapping the habitat suitability of West Nile virus vectors in southern Quebec and eastern Ontario, Canada, with species distribution modeling and satellite earth observation data. *Remote Sensing*. 2021;13(9):1637. <https://doi.org/10.3390/rs13091637>
- 46 Talbot B, Kulkarni MA, Rioux-Rousseau M, Siebels K, Kotchi SO, Ogden NH, et coll. Ecological niche and positive clusters of two West Nile virus vectors in Ontario, Canada. *EcoHealth*. 2023;20(3):249–62. <https://doi.org/10.1007/s10393-023-01653-8>
- 47 Montgomery RR, Murray KO. Risk factors for West Nile virus infection and disease in populations and individuals. *Expert Review of Anti-infective Therapy*. 2015;13(3):317–25. <https://doi.org/10.1586/14787210.2015.1007043>
- 48 Sutinen J, Fell DB, Sander B, Kulkarni MA. Comorbid conditions as risk factors for West Nile neuroinvasive disease in Ontario, Canada: a population-based cohort study. *Epidemiology and Infection*. 2022;150:e103. <https://doi.org/10.1017/S0950268822000887>
- 49 Institut national de santé publique du Québec. Géoportail de santé publique du Québec [Internet]. 2022. Repéré à : <https://www.inspq.qc.ca/geomatique/geoportail>
- 50 Hamer GL, Anderson TK, Donovan DJ, Brawn JD, Krebs BL, Gardner AM, et coll. Dispersal of adult *Culex* mosquitoes in an urban West Nile virus hotspot: A mark-recapture study incorporating stable isotope enrichment of natural larval habitats. *PLOS Neglected Tropical Diseases*. 2014;8(3):e2768. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0002768>
- 51 U.S. Centers for Disease Control and Prevention. Clinical signs and symptoms of West Nile virus disease [Internet]. 2024. Repéré à <https://www.cdc.gov/west-nile-virus/hcp/clinical-signs/index.html>
- 52 Organisation mondiale de la Santé. Virus du Nil occidental [Internet]. 2017. Repéré à <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/west-nile-virus>
- 53 Gouvernement du Québec. Se protéger et protéger ses animaux des piqûres de moustiques et de tiques [Internet]. 2024. Repéré à <https://www.quebec.ca/sante/conseils-et-prevention/sante-et-environnement/se-protger-des-piqures-de-moustiques-et-de-tiques>

ANNEXE 1 PERSONNES CONSULTÉES POUR LE PROJET

<p>Bureau d'information et d'études en santé des populations</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Matthieu Tandonnet (INSPQ – Bureau d'information et d'études en santé des populations) • Nathalie Gravel (INSPQ – Bureau d'information et d'études en santé des populations) • Antoine Saint-Amand (INSPQ – Direction de la santé environnementale, au travail et de la toxicologie et Bureau d'information et d'études en santé des populations)
<p>Observatoire multipartite québécois sur les zoonoses et l'adaptation aux changements climatiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alejandra Irace-Cima (INSPQ – Direction des risques biologiques) • Ariane Adam-Poupart (INSPQ – Direction des risques biologiques) • Annabelle Mouammine (INSPQ – Laboratoire de santé publique du Québec) • Antoine Saint-Amand (INSPQ – Direction de la santé environnementale, au travail et de la toxicologie et Bureau d'information et d'études en santé des populations) • Ariane Massé (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs) • Camille Robitaille-Bérubé (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs) • Catherine Bouchard (Agence de la santé publique du Canada – Laboratoire national de microbiologie) • Céline Campagna (Ouranos) • Christian Renaud (Héma-Québec) • Daniel Kneeshaw (Université de Québec à Montréal – Centre d'étude de la forêt) • Geneviève Baron (Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de l'Estrie–Centre hospitalier universitaire de Sherbrooke) • Isabelle Picard (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation) • Juliette Martin (Ministère de la Santé et des Services sociaux) • Maryse Barrette (Ville de Montréal) * <i>Absente du projet</i> • Nathalie Bleau (Ouranos) * <i>Membre jusqu'en juin 2024</i> • Nicholas Ogden (Agence de la santé publique du Canada – Laboratoire national de microbiologie) • Olivia Jerczynski (Ministère de la Santé et des Services sociaux) <p>* <i>Membre jusqu'en juin 2024</i></p>

<p>Groupe d'experts sur les maladies transmises par les moustiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alejandra Irace-Cima (INSPQ – Direction des risques biologiques) • Ariane Adam-Poupart (INSPQ – Direction des risques biologiques) • Antoinette Ludwig (Agence de la santé publique du Canada – Laboratoire national de microbiologie) • Christian Renaud (Héma-Québec) • Christian Therrien (INSPQ – Laboratoire de santé publique du Québec) • Gabrielle Dimitri-Masson (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation) • Louise Lambert (INSPQ – Direction des risques biologiques) <i>* Membre jusqu'en octobre 2023</i> • Marie-France Beaudet (Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de la Capitale-Nationale) <i>* Membre jusqu'en octobre 2024</i> • Najwa Ouhoumane (INSPQ – Direction des risques biologiques) <i>* Membre jusqu'en septembre 2024</i> • Stéphane Lair (Centre québécois sur la santé des animaux sauvages) • Stéphanie Jodoin (Ministère de la Santé et des Services sociaux) <i>* Membre jusqu'en octobre 2024</i>
<p>Autres personnes consultées</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Colette Gaulin (Ministère de la Santé et des Services sociaux) • Gabrielle Ngambo (Ministère de la Santé et des Services sociaux) • Nadine Magali-Ufitinema (Ministère de la Santé et des Services sociaux) • Sophie Mokas (Ministère de la Santé et des Services sociaux)

Centre d'expertise et
de référence en santé publique

www.inspq.qc.ca