

## Utilisation d'indicateurs météorologiques de la présence de vecteurs du virus du Nil occidental (VNO)



# **Utilisation d'indicateurs météorologiques de la présence de vecteurs du virus du Nil occidental (VNO)**

## **SYNTHÈSE DE CONNAISSANCES**

Direction des risques biologiques et de la santé au travail

Avril 2019

## **AUTEUR**

Karl Forest-Bérard, M. Sc.

Direction des risques biologiques et de la santé au travail

## **COLLABORATEURS**

Alejandra Irace Cima, M.D., FRCPC

Marie-Ève Turcotte, D.M.V., M. Sc.

Roxane Pelletier, D.M.V., M. Sc.

Geneviève Germain, M. .Sc.

Direction des risques biologiques et de la santé au travail

## **SOUS LA COORDINATION DE**

Anne Kimpton, M. Sc.

Direction des risques biologiques et de la santé au travail

## **MISE EN PAGE**

Adolphine Luzayday, agente administrative

Direction des risques biologiques et de la santé au travail

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs remercient Marlène Mercier et Marie-Andrée Leblanc du Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec (MSSS) pour leur soutien et leurs commentaires. Les auteurs tiennent également à remercier Ariane Adam-Poupart, Anne Kimpton, Najwa Ouhoumane et Anne-Marie Lowe de l'INSPQ pour le soutien fourni à la réalisation du présent document. Un merci tout particulier pour madame Vicky Tessier, du centre de documentation du même institut, sans qui la méthodologie présentée dans le présent ouvrage n'aurait pas été aussi rigoureuse.

## **CONTRIBUTION FINANCIÈRE**

Subvention du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec (MSSS)

*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 en formulant une demande au guichet central du Service de la gestion des droits d'auteur des Publications du Québec à l'aide d'un formulaire en ligne accessible à l'adresse suivante :*

*<http://www.droitauteur.gouv.qc.ca/autorisation.php>, ou en écrivant un courriel à [droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca](mailto:droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca)*

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

Dépôt légal – 2<sup>e</sup> trimestre 2019

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN : 978-2-550-83873-9 (PDF)

© Gouvernement du Québec (2019)

## Table des matières

<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>III</b>
<b>Glossaire</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste des sigles et acronymes</b> .....	<b>IX</b>
<b>Faits saillants</b> .....	<b>1</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Objectifs</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Stratégie et démarche de recension des écrits</b> .....	<b>11</b>
3.1 Critères d'inclusion et d'exclusion.....	11
3.2 Stratégie de recension des écrits et bases de données ciblées.....	12
3.3 Termes de recension des écrits.....	13
3.4 Bilan de la recension des écrits.....	14
<b>4 Concepts préliminaires</b> .....	<b>15</b>
4.1 Notions entomologiques, épidémiologiques et virologiques de base.....	15
4.2 Température ambiante.....	18
4.3 Précipitations.....	19
<b>5 État des connaissances au sujet des effets de la température et des précipitations sur Cx spp. et sur le VNO</b> .....	<b>21</b>
5.1 Ampleur des effets répertoriés.....	21
5.2 Effets de la température ambiante.....	22
5.3 Effets des précipitations.....	23
5.4 Portrait global des relations entre les deux indicateurs.....	24
5.5 Notions de synchronisme et de temporalité.....	25
5.6 Modélisation.....	27
5.7 Nuances importantes.....	29
<b>6 Constats sur la pertinence et l'utilité de ces deux indicateurs</b> .....	<b>33</b>
<b>7 Forces et limites</b> .....	<b>35</b>
<b>8 Perspectives et conclusion</b> .....	<b>37</b>
<b>9 Références bibliographiques</b> .....	<b>39</b>



## Liste des tableaux

Tableau 1	Critères de forme concernant la recherche documentaire.....	11
Tableau 2	Critères de pertinence et de contexte concernant la recherche documentaire.....	12
Tableau 3	Bases de données interrogées .....	12
Tableau 4	Planification de la recension documentaire : Concepts, mots-clés et limites.....	13
Tableau 5	Synthèse des informations concernant les effets des variations de température et des précipitations sur l'épidémiologie du VNO .....	24
Tableau 6	Exemple de disparités de conclusions tirées de différentes études utilisant des SIG (abondance de vecteurs du VNO vs. conditions climatiques et utilisation des sols) .....	28



## Glossaire<sup>1</sup>

**Anautogène** : Terme utilisé pour décrire les femelles de parasites (ex. : diptères hématophages) nécessitant une source protéinique externe (ex. : repas sanguin) pour la maturation de leurs œufs. Par opposition à « autogène ».

**Arthropode** : Embranchement d'animaux invertébrés, regroupant notamment les insectes, les arachnides, les myriapodes et les crustacés.

**Arbovirose** : Maladie virale due à un arbovirus (définition épidémiologique et non virologique).

**Arbovirus** : Ensemble des virus ayant pour vecteur les arthropodes hématophages (tiques, moustiques, etc.). Ce terme ne fait pas partie de la classification taxonomique des virus (rassemble différentes classes de virus). Provient de la contraction de l'expression anglaise Arthropod-Borne Virus.

**Capacité de charge** : Désigne la quantité (maximale ou optimale, selon les définitions) d'individus qu'une niche écologique donnée peut supporter à un moment donné.

**Capacité vectorielle** : Aptitude d'un vecteur à s'infecter sur un hôte (vertébré), à permettre le développement d'un agent pathogène et à le transmettre à un autre hôte dans les conditions du milieu naturel.

**Compétence vectorielle** : Caractéristique intrinsèque du vecteur à s'infecter sur un hôte (vertébré), à permettre le développement d'un agent pathogène et à le transmettre à un autre hôte réceptif.

**Culicidés** : Famille d'insectes communément appelés « moustiques », appartenant à l'ordre des diptères, et au sous-ordre des nématocères.

**Culex (Cx)** : Genre de moustiques dont plusieurs espèces sont des parasites hématophages vecteurs de maladies.

**Cycle enzootique** : Cycle de transmission des zoonoses, faisait intervenir plusieurs hôtes (animaux sauvages, des animaux domestiques et l'humain) et assurant l'amplification et la dissémination d'un agent pathogène.

**Cycle gonotrophique** : Cycle complet du développement ovarien chez un moustique (ou autre insecte vecteur), à partir du repas sanguin jusqu'au moment de la ponte des œufs pleinement développés.

**Diapause** : Similaire à l'hibernation chez les mammifères, période d'inactivité durant laquelle le métabolisme est ralenti et le développement ou la croissance des insectes est suspendu.

**Degré-Jour (DJ) (v. anglaise : Degree-Day)** : Mesure empirique utilisée pour calculer l'accumulation de chaleur, et sert à estimer la durée d'un développement biologique en fonction de la température. Valeur propre à chaque espèce (notion de « temps physiologique »).

---

<sup>1</sup> Tiré et adapté de Fontenille D *et al.*, (2009), Meyer C *et al.*, (2017), et de Last JM (2004).

**Ectotherme** : Qualifie un animal dont la température dépend de celle du milieu ambiant (également appelé « à sang froid »). Par opposition à « homéotherme » (capable de réguler sa température indépendamment du milieu).

**Endémicité** : Qualité endémique d'une maladie. En épidémiologie, une maladie est dite *endémique* d'une région si elle y sévit de manière permanente. En biologie, une espèce est dite *endémique* si sa présence est particulière à une localité ou une région donnée.

**Endémisation** : Terme utilisé pour caractériser le processus par lequel une maladie nouvellement apparue sur un territoire donné se maintient dans la zone à un niveau constant.

**Eutrophisation** : Apport excessif d'éléments nutritifs (ex. : nitrates, phosphates) dans un plan d'eau, entraînant une prolifération végétale, une accumulation de débris organiques, un appauvrissement en oxygène, et un déséquilibre écosystémique.

**Gîte larvaire** : Expression largement utilisée dans la littérature scientifique pour désigner les plans d'eau abritant des moustiques immatures (larves et pupes) et où les moustiques adultes peuvent se reproduire en y pondant leurs œufs.

**Hématophage** : Caractérise certains arthropodes dont le régime alimentaire est en partie constitué de sang.

**Indicateur** : Données concrètes et variables, simples ou complexes, quantitatives ou qualitatives dont le suivi et/ou la comparaison dans le temps (ou dans l'espace) permettent d'apprécier ou mesurer des changements intervenus (ou des différences).

**Maladie émergente** : Maladie dont l'incidence réelle augmente de manière significative dans une population donnée, dans une zone géographique donnée et pendant une période définie par rapport à la situation épidémiologique habituelle de cette maladie.

**Ornithophile** : Se dit de moustiques effectuant leurs repas sanguins préférentiellement sur les oiseaux.

**Ovoposition** : Ponte des œufs sur un support naturel (souche d'arbre, plantes, radeau) ou artificiel (récipient, pots de fleurs, etc.).

**Période d'incubation extrinsèque** : Temps nécessaire entre l'ingestion d'un repas sanguin sur un hôte infecté par un virus donné et la capacité du vecteur de transmettre ce même virus (soit le délai nécessaire pour le virus de passer du tube digestif du vecteur à ses glandes salivaires, puis de se reproduire suffisamment afin d'assurer sa transmissibilité).

**Système d'information géographique** : Système informatisé conçu pour recueillir, analyser et présenter plusieurs types de données spatiales et géographiques.

**Température rétrospective** : Valeurs de températures enregistrées cumulativement sur une période de temps déterminée (ex. : 100 jours avant le déploiement de pièges visant à capturer des moustiques).

**Vecteur** (entomologie médicale) : Arthropode hématophage assurant, par un comportement spécifique, la transmission biologique et active d'un agent pathogène (bactérie, virus, protozoaire ou helminthe) d'un hôte vertébré donneur à un autre hôte vertébré réceptif (étape de développement dans le vecteur limitant le cycle). Notion de spécificité parasitaire.

**Virémie** : Période pendant laquelle le virus est présent dans la circulation sanguine de l'hôte vertébré avec un potentiel de se disséminer.

**Zoonose** : Maladies ou infections causées par des virus, des bactéries, des parasites, des fungi et des prions qui se transmettent naturellement entre les animaux et les humains.



## Liste des sigles et acronymes

CCL	Capacité de charge de larvaire
Cx	<i>Culex</i>
DJC	Degré-jour cumulatif
DPI	Jours post-infection
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec
MTV	Maladie zoonotique à transmission vectorielle
PIE	Période d'incubation extrinsèque
SIG	Système d'information géographique
Spp	Espèces
VEEE	Virus de l'encéphalite équine de l'Est
VJC	Virus de Jamestown Canyon
VNO	Virus du Nil occidental
VSGC	Virus du séro groupe Californie



## Faits saillants

Le rôle intrinsèque des conditions météorologiques sur l'incidence et la distribution des zoonoses est bien documenté. L'exploitation de ces paramètres météorologiques en guise d'indicateurs de la présence de certains vecteurs pourrait permettre d'émettre des prédictions significatives au sujet des éclosions. Toutefois, traduire des paramètres météorologiques en indicateurs est difficile à réaliser, notamment à cause de la non-linéarité des dynamiques de transmission zoonotique.

Cette synthèse de connaissances vise à évaluer le potentiel d'utilisation de la température et des niveaux de précipitations à titre d'indicateurs météorologiques de la présence de certains vecteurs du virus du Nil occidental (VNO) au Québec.

Elle soutient également la réflexion sur les indicateurs météorologiques à inclure dans la surveillance intégrée du VNO et sur les travaux de recherche à réaliser dans un contexte de globalisation et de changements climatiques.

### Effets de la température et des précipitations

- La température tient un rôle incontestable à titre d'indicateur, puisque les niveaux de croissance et d'activité vectoriel et viraux sont habituellement température-dépendants. Les précipitations tiennent également un rôle, quoique de façon moins linéaire.
- Les notions de temporalité et de synchronicité sont significatives, puisque les répercussions combinées de la température et des précipitations sont supérieures lorsque ces conditions météorologiques ont lieu dans un certain ordre.
- L'abondance relative de *Culex pipiens/restuans* est probablement le paramètre le plus facilement estimable à partir des paramètres météorologiques.
- Il n'existe cependant pas de proportionnalité directe entre l'abondance ou la densité de vecteurs et le risque de transmission de l'infection à l'humain.

### Pertinence d'utilisation à titre d'indicateurs

- Puisqu'il existe une relation entre le vecteur *Culex pipiens/restuans*, la transmission du VNO, les niveaux de précipitations et les températures ambiantes, l'utilisation combinée de ces deux paramètres météorologiques pourrait vraisemblablement se traduire en indicateur, avec certaines nuances importantes.
- Toutefois, il est hasardeux de tirer des conclusions sur la pertinence de leur utilisation en tant qu'indicateurs prédictifs du risque d'infection humain au VNO dans une optique de vigilance puisqu'une multitude d'interactions avec d'autres paramètres dynamiques ne peuvent être ignorées.
- De plus, l'utilisation individuelle des paramètres météorologiques de la température et des niveaux de précipitation demeure difficile étant donné le nombre élevé de variables et de facteurs confondants.

### Perspectives

- Malgré certaines lacunes, des prédictions significatives peuvent être obtenues en incorporant les valeurs des indicateurs météorologiques dans des modèles validés, tenant compte de la complexité des interactions en jeu, plutôt qu'individuellement. Ce type de démarche requiert une expertise et un investissement substantiels.

- Puisque le risque de transmission augmente avec le nombre de degrés-jours cumulatifs, leur utilisation peut représenter une approche intéressante et simple à implémenter.
- Toutefois, comme les conclusions obtenues par l'entremise d'études étrangères peuvent difficilement être extrapolées pour parler de la réalité québécoise, il conviendrait de mener une validation régionale.

## Sommaire

### Contexte

La dernière décennie a été marquée par l'émergence, voire la réémergence, de plusieurs zoonoses, dont notamment plusieurs arboviroses. Les conditions météorologiques tiennent certainement un rôle pivot tant sur les vecteurs que sur les agents pathogènes qu'ils véhiculent, de sorte que leur incidence et distribution seront nécessairement amenées à changer considérablement dans un contexte de globalisation et de changements climatiques.

Or, depuis la détection du VNO pour la première fois sur le continent américain en 1999 (New York), une imposante quantité de travaux ont été réalisés afin de décortiquer le rôle des conditions météorologiques et de construire des modèles prédictifs utiles en santé publique. Étant donnée la non-linéarité de la dynamique de transmission zoonotique, il est complexe d'émettre avec précision des prédictions significatives au sujet des éclosions.

Donnant suite à la recommandation sur les interventions à privilégier concernant le risque relié au VNO au Québec, le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) a confié à l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) la réalisation d'un recensement de la littérature et des données scientifiques sur les indicateurs météorologiques en lien avec la présence de vecteurs du VNO.

### Objectifs

Ce portrait a pour objectif de raffiner les connaissances sur la température et les niveaux de précipitations à titre d'indicateurs météorologiques de la présence de certains vecteurs du VNO au Québec, particulièrement *Culex pipiens/restuans*. Il cherche également à soutenir la réflexion sur les indicateurs météorologiques à inclure dans la surveillance intégrée du VNO et apporter des éléments de réflexion sur de travaux de recherche à réaliser dans un contexte de globalisation et de changements climatiques.

### Méthodologie

La stratégie de recherche pour cette recension s'est réalisée en deux temps : d'abord en interrogeant Ovid et EBSCOhost, plates-formes rassemblant de données biomédicales (recherche en langage contrôlé), puis en recherchant plus librement dans les bases de données ouvertes Google Scholar et PubMed (recherche naturelle).

La sélection des documents s'est faite en fonction de critères relatifs à la forme, à la pertinence et à la qualité du contenu des articles. De plus, un filtre additionnel plus restrictif a été appliqué concernant les espèces de vecteurs ciblés (i.e. *Culex pipiens/restuans*), la zone où l'étude a été réalisée (priorisant la proximité au Québec, sinon les zones géographiquement/climatiquement similaires), et l'année de publication (à partir de 2006, avec une préférence pour les articles les plus récents).

La recherche s'est effectuée en février 2017, dans les champs de titre et de résumé des bases de données (littérature grise exclue). Au total, 269 documents ont été répertoriés dans la littérature scientifique à la suite de l'interrogation des différentes bases de données selon les critères choisis. Après priorisation, 20 articles ont été retenus pour analyse.

## Principaux constats

### Effets de la température et des précipitations

- La température tient un rôle incontestable, pouvant servir d'indicateur fort. Les niveaux de croissance et d'activité des vecteurs sont habituellement température-dépendants. Il existe tout de même une fourchette de températures optimales, au-delà de laquelle le développement est nul ou ralenti.
- Les précipitations tiennent également un rôle, mais de façon beaucoup moins linéaire (effets à retardement difficiles à discerner, mais tout de même non négligeables). La pluie aurait un effet négatif sur le comportement et le niveau d'activité journalier des moustiques, mais tiendrait un rôle déterminant sur la dynamique populationnelle des semaines suivantes, notamment par ses répercussions au niveau des habitats larvaires.
- Les notions de temporalité et de synchronicité sont significatives, puisqu'un effet tandem ou synergique des paramètres est possible lorsque combinés dans le bon ordre. Par exemple, la combinaison de températures élevées et de précipitations faibles donne lieu à des répercussions supérieures qu'avec un seul paramètre isolé.
- L'abondance relative de *Cx spp.* est probablement le paramètre le plus facilement estimable à partir des paramètres météorologiques. Une température élevée et de faibles précipitations seraient de bons indicateurs en termes d'abondance pour ces espèces. Plus spécifiquement :
  - Les conditions *annuelles* optimales pour favoriser l'abondance de *Cx spp.* seraient: des conditions hivernales douces, un printemps et un été secs, des vagues de chaleur tôt en saison estivale avec des températures minimales élevées, et un automne chaud et humide;
  - Les conditions *journalières* optimales seraient: des températures élevées (au-dessus des normales saisonnières), avec un faible facteur éolien et de faibles précipitations (précipitations élevées dans les semaines précédentes);
- Il n'existe pas de proportionnalité directe entre l'abondance ou la densité de vecteurs et le risque de transmission à l'humain (autrement dit, la présence du vecteur seule ne suffit pas à la transmission du pathogène).

### Pertinence d'utilisation

Si un nombre imposant de paramètres environnementaux et météorologiques peuvent être considérés comme ayant une influence sur l'épidémiologie du VNO en général, la température et les précipitations sont progressivement devenues les favoris en tant que prédicteurs d'activités vectorielles et virales.

- Combinés, les deux paramètres météorologiques de la température et des précipitations peuvent notamment avoir des répercussions directes et indirectes sur la compétence vectorielle, la dynamique des populations de moustiques, la transmission virale, l'écologie des moustiques et le comportement des vecteurs et de leurs hôtes.
- Il ne fait aucun doute qu'il existe une relation entre le vecteur *Culex pipiens/restuans*, la transmission du VNO, les niveaux de précipitations et les températures ambiantes. Ces deux paramètres météorologiques peuvent vraisemblablement être utilisés à titre d'indicateurs, avec certaines nuances importantes.
- En effet, bien que leurs effets soient bien documentés dans la littérature scientifique, ils dépendent d'une multitude d'interactions avec d'autres paramètres dynamiques qui ne peuvent être ignorés. Du coup, il devient hasardeux de tirer des conclusions sur la pertinence de leur utilisation en tant qu'indicateurs prédictifs du risque d'infection humaine au VNO dans une optique de vigilance.

- L'utilisation individuelle de ces deux paramètres météorologiques serait à tout le moins simpliste. Le nombre élevé de variables et de confondants fait en sorte que les modèles et les outils actuellement disponibles sont encore imparfaits.

### Perspectives

- La température et les précipitations ont des effets incontestables sur les niveaux d'activité vectorielle et virale (*Cx pipiens/restuans*, VNO).
- Étant donné la vaste quantité de paramètres impliqués et la non-linéarité de certaines relations entre chacun, la température et les précipitations peuvent être considérées comme indicateurs, mais avec certaines nuances non-négligeables.
- Par exemple, considérant les fluctuations spatiotemporelles existantes, il serait intéressant de favoriser l'utilisation de données microclimatiques rétrospectives, c'est-à-dire des données locales et longitudinales, plutôt que régionales et quotidiennes, afin de prévoir les tendances saisonnières.
- Malgré certaines lacunes, des prédictions significatives peuvent être obtenues en incorporant les valeurs de ces indicateurs dans des modèles validés, tenant compte de la complexité des interactions en jeu, plutôt qu'individuellement. Ce genre de démarche requiert toutefois une expertise et un investissement substantiel.
- Puisque le risque de transmission augmente avec le nombre de degrés-jours cumulatifs (DJC), l'utilisation de ce paramètre peut représenter une approche intéressante et simple à implémenter. Bien que moins exhaustifs, les DJC permettent notamment d'estimer la fenêtre spatio-temporelle où il existe un risque potentiel de transmission, permettant de créer des cartes graduées et des alertes.
- Ceci dit, le suivi météorologique présentement effectué au Québec est fait à titre exploratoire seulement, puisque la méthodologie n'a pas été encore validée pour le territoire québécois. Les conclusions obtenues par l'entremise d'études étrangères peuvent donc difficilement être extrapolées pour parler de la réalité québécoise, et il conviendrait de mener une validation régionale.
- Alternativement, il pourrait être intéressant d'incorporer ces indicateurs dans les programmes de surveillance intégrée du VNO au Québec, en faisant par exemple la construction d'un modèle utilisant les données de surveillance entomologique (taux d'infection des vecteurs) et des données de cas de VNO humains rapportés (registre de maladie à déclaration obligatoire) pour émettre des prévisions. Ceci dit, cette avenue s'avère peut-être encore prématurée, étant donné le manque d'études locales (absence de validation: manque d'information sur les vecteurs endémiques locaux, à petite échelle, sur différents secteurs et différentes années).
- Il serait intéressant de développer de meilleures méthodologies ou de meilleurs modèles (plus de données, sur une plus longue période de temps, incluant plus de paramètres, surtout longitudinalement) permettant par exemple de pouvoir éventuellement émettre des alertes sur les périodes et les zones à risque en fonction de la météorologie.
- Les notions présentées dans ce document sont particulièrement pertinentes dans un contexte de changements climatiques, qui contribueraient au maintien du VNO (processus d'endémisation) à plusieurs endroits sur la planète. Ceci soutient l'importance du développement de notre capacité à prévoir comment les facteurs météorologiques locaux et les facteurs environnementaux interdépendants affecteront les risques de transmission du VNO à l'avenir au Québec.



## 1 Introduction

À l'échelle internationale, la dernière décennie a été marquée par l'émergence, voire la réémergence, de plusieurs zoonoses, dont plusieurs arboviroses (Kulkarni, 2015; CDC, 2016). Les conditions météorologiques jouent un rôle pivot sur les cycles de vie tant des moustiques que des agents pathogènes responsables de zoonoses de sorte que leur incidence et répartition géographique seront nécessairement amenées à changer considérablement dans un contexte de globalisation et de changements climatiques.

À ce jour, une imposante quantité de travaux a été réalisée sur les principes biologiques qui sous-tendent les relations vecteurs/hôtes, ou encore la modélisation mathématique/statistique basée sur différentes sources de données à l'échelle internationale. Depuis la détection du VNO pour la première fois sur le continent américain en 1999 (New York), les approches pour suivre son introduction (et celles d'autres arboviroses) en Amérique du Nord n'ont cessé d'évoluer. Plusieurs tentatives de modélisation (notamment par le déploiement de systèmes d'information géographique (SIG) et par télédétection) ont d'ailleurs été mises en place dans le but de mieux comprendre la dynamique spatiotemporelle existante entre réservoirs, vecteurs et hôtes humains du VNO, ou pour mettre en évidence des facteurs de risque et des conditions favorables à son implantation (Ozdenerol, 2013).

C'est dans ce contexte que le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) a confié à l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) la réalisation du recensement de la littérature et des données scientifiques sur les indicateurs météorologiques en lien avec la présence de vecteurs du VNO. Il donne ainsi suite à la recommandation sur les interventions à privilégier concernant le risque relié au VNO au Québec (INSPQ, 2014-15).

Le présent document fait donc office de synthèse de ce recensement de connaissances sur les indicateurs météorologiques en lien avec le VNO. Nous présenterons d'abord le contexte particulier du dossier, les alignements choisis ainsi que les objectifs spécifiques. Par la suite, la méthodologie de la démarche de recension sera développée, avant de présenter les résultats descriptifs et la synthèse. Finalement, les principales conclusions seront exposées avec certaines pistes de recherche qu'il serait intéressant d'explorer dans le cadre de futures études complémentaires.



## 2 Objectifs

La transmission des arboviroses est influencée par de nombreux paramètres pouvant servir d'indicateur. Ces paramètres, raccordés à la biologie des différents hôtes et vecteurs impliqués dans la transmission du VNO, sont en interrelation constante au sein d'un environnement dynamique et influencé par des paramètres abiotiques, tels que le climat ou l'hydrographie. Comme pour tout autre concept d'ordre biologique, une compréhension exhaustive de l'ensemble de ces paramètres requiert habituellement une analyse conjointe à différentes échelles de plusieurs sources et types de données de façon à saisir toute la complexité des phénomènes en question.

Devant la vaste quantité de paramètres pouvant être pris en considération, la forte variabilité spatio-temporelle existante, les divergences interspécifiques au sein des relations vecteurs/virus/hôtes (comportementales, physiologiques et/ou biologiques) et la complexité des cycles enzootiques, des choix ont dû être faits afin de circonscrire la portée des travaux et de concentrer les efforts dans un premier temps à mettre en lumière la relation entre le VNO et certains indicateurs spécifiques.

Il est important de comprendre les subtilités des dynamiques de populations des vecteurs présents sur le territoire afin de développer des stratégies de contrôle et d'interventions qui soient appropriées. Puisque les conditions météorologiques y tiennent nécessairement un rôle, il est essentiel de déchiffrer comment elles influencent l'épidémiologie du VNO afin d'être en mesure de concerter les efforts de contrôle (Yoo, 2016). La température (parfois présentée en degré-jour [DJ]) et les niveaux de précipitations (en millimètres de pluie tombée) sont sans doute les indicateurs météorologiques les plus documentés et les plus fréquemment utilisés à l'heure actuelle pour caractériser la présence de vecteurs de zoonoses; ils représentent donc un bon point de départ pour les présents travaux.

L'objectif principal de cette recension de littérature est de raffiner les connaissances sur la température et les niveaux de précipitations à titre d'indicateurs météorologiques de la présence de certains vecteurs du VNO au Québec, notamment *Cx pipiens-restuans*.

Cette recension devrait également soutenir la réflexion sur les indicateurs météorologiques à inclure dans la surveillance intégrée du VNO et apporter des éléments de réflexion sur des travaux de recherche à réaliser.

Le présent ouvrage cherche essentiellement à répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la pertinence et l'utilité pratique d'employer la température extérieure et les niveaux de précipitations à titre d'indicateurs météorologiques de la présence des moustiques vecteurs de VNO au Québec? Qu'est-ce qui justifie l'utilisation de ces indicateurs plutôt que d'autres pour la modélisation du VNO en Amérique du Nord (**pertinence**)?
- Quels impacts ont-ils sur la dynamique des populations de vecteurs (**abondance**)? Sur les notions de virémie? De compétence vectorielle? De transmission virale?
- Qu'est-ce qui est fait à l'heure actuelle à partir de ces indicateurs (**méthodologie**)?
- Quelles autres tendances peut-on en dégager (**perspectives**)?



### 3 Stratégie et démarche de recension des écrits

Étant donné la nature non exhaustive de cette recension, une approche par recherche naturelle et contrôlée de la littérature scientifique a été retenue<sup>2</sup>. La section suivante présente la stratégie de recherche employée : choix des termes de recherche permettant de sonder la littérature scientifique efficacement (mots-clés), identification des ressources et des moteurs de recherche consultés, définition des paramètres de recherche (critères d'inclusion et d'exclusion), etc.

#### 3.1 Critères d'inclusion et d'exclusion

La sélection des documents pour cette recension s'est faite en fonction de trois critères relatifs à la forme (tableau 1), à la pertinence (tableau 2) et à la qualité du contenu des articles.

**Tableau 1 Critères de forme concernant la recherche documentaire**

Critères	Description
Limite linguistique	Anglais, Français, Espagnol <sup>3</sup>
Limite chronologique	Du 1 <sup>er</sup> janvier 2006 au 16 février 2017 (date de la recherche)
Format de publication	Doit contenir un résumé ( <i>abstract</i> ) ou une table des matières

Sur le plan du contexte (tableau 2), les études réalisées au Québec ont été considérées en premier, puis les études menées en sol canadien, en Amérique du Nord, ou dans des territoires géographiquement ou climatiquement similaires. Ce critère est toutefois optionnel : bien qu'idéal, il ne s'agit pas d'un frein pour l'inclusion dans notre sélection (trop peu d'études ne répondant exactement à ces critères).

Sur le plan de la pertinence (tableau 2), le titre ou le résumé des articles ciblés devaient démontrer la présence d'un lien avec les questions soulevées.

De plus, nous avons opté pour l'application d'un filtre additionnel plus restrictif concernant les espèces de vecteurs ciblés (i.e. *Cx pipiens/restuans*), la zone où l'étude a été réalisée (le plus près du Québec possible, sinon dans une zone géographiquement/climatiquement similaire), et l'année de publication (à partir de 2006, avec une préférence pour les articles les plus récents). Ces filtres supplémentaires ont permis de cibler les meilleurs articles afin de rendre un document synthèse plus concis et plus pertinent.

<sup>2</sup> Bien qu'il soit tout à fait pertinent d'inclure le contenu de la littérature grise dans cette recherche (publications académiques, institutionnelles, gouvernementales, non commerciales), celle-ci a été exclue des paramètres de recherche à cette étape-ci du processus. Certaines références externes ont tout de même été consultées à titre complémentaire (ne provenant pas de la recherche documentaire).

<sup>3</sup> Bien qu'inclusif, aucun article pertinent dans une langue autre que l'anglais n'a été trouvé lors de la recherche.

**Tableau 2 Critères de pertinence et de contexte concernant la recherche documentaire**

Critères	Description	Inclusion : idéal (++)	Inclusion : acceptable (+)	Exclusion (-)
Pertinence	Le document doit aborder la <b>température</b> et/ou les <b>précipitations</b> dans un contexte épidémiologique en lien avec le VNO  Le document doit se concentrer sur les <b>vecteurs</b> <i>Culex pipiens/restuans</i>	Le document traite de l'utilisation de ces critères comme indicateurs météo de vecteurs du VNO.  Le document cible un vecteur de type <i>Culex</i>	Le document parle d'indicateurs météo et/ou du VNO.  Le document cible d'autres <i>Culex</i> ou d'autres vecteurs du VNO présents au Québec, ou ailleurs au Canada	Le document n'aborde ni les indicateurs météo ciblés, ni le VNO.  Le document n'aborde aucun vecteur du VNO
Contexte	<i>Optionnel</i> – Géographie : les conditions environnementales, techniques et démographiques doivent être comparables à celles du Québec.	Les travaux se concentrent sur les réalités québécoises.	Les travaux sont réalisés ailleurs qu'au Québec, mais dans un contexte comparable, en tout ou en partie.	<i>Critère souhaitable, mais non obligatoire.</i>

### 3.2 Stratégie de recension des écrits et bases de données ciblées

Trois stratégies ont été utilisées pour effectuer cette recension des écrits. La première consistait à interroger Ovid ([ovid.com](http://ovid.com)) et EBSCOhost ([ebscost.com](http://ebscost.com)), deux plateformes rassemblant plusieurs bases de données biomédicales (tableau 3). Ces banques d'information ont été choisies en fonction de leur grande couverture en littérature d'ordre scientifique et donc de leur susceptibilité à contenir des articles pertinents pour la question de recherche. Cette étape plus exhaustive s'est réalisée en langage contrôlé (utilisation de jargon de recherche spécifique à chaque base de données).

La deuxième stratégie consistait à rechercher plus librement dans les bases de données ouvertes Google Scholar ([scholar.google.ca](http://scholar.google.ca), [.com](http://scholar.google.com) et [.fr](http://scholar.google.fr)) et PubMed ([ncbi.nlm.nih.gov/pubmed](http://ncbi.nlm.nih.gov/pubmed)), en utilisant les critères précédemment décrits (langage naturel). Bien que parfois redondante, cette étape permettait de déceler certains articles qui auraient échappé à l'indexage, provenant de sources exclues des bases de données, ou ayant été publiés dans d'autres supports. Finalement, la troisième stratégie consistait à consulter les bibliographies des documents déjà identifiés lors des étapes précédentes, à titre complémentaire.

**Tableau 3 Bases de données interrogées**

Moteurs de recherche	Langage de recherche	Base de données
Ovid	Contrôlé	Ovid MEDLINE(R) Epub Ahead of Print, In-Process & Other Non-Indexed Citations, Ovid MEDLINE(R) Daily and Ovid MEDLINE(R) (1946-2017) EMBASE (1974-)
EBSCOhost	Contrôlé	Environment Complete (1888-2017)
Google Scholar	Naturel	Google Scholar (.com) (.ca) (.fr)
PubMed		PudMed NCBI, MEDLINE

### 3.3 Termes de recension des écrits

Quatre concepts ont été retenus afin de cerner les documents pertinents à notre travail soit : ceux relatifs (1) aux indicateurs météorologiques, (2) aux zoonoses, (3) aux vecteurs du VNO présents au Québec, et finalement (4) à différentes notions d'épidémiologie et/ou d'entomologie médicale. Tel que mentionné précédemment, les notions de géographie ont été considérées de manière optionnelle. Chacun de ces concepts se décline ensuite en différents mots-clés et en différentes requêtes, tel que présenté dans le tableau 4.

**Tableau 4 Planification de la recension documentaire : Concepts, mots-clés et limites**

	<b>Concept 1 : Indicateurs météorologiques</b>	<b>Concept 2 : Zoonoses</b>	<b>Concept 3 : Vecteurs (<i>Culex spp.</i>)</b>	<b>Concept 4 : Paramètres entomologiques /épidémiologiques</b>	<b>Limites</b>
Mots-clés en français	Indicateur météorologique Température Précipitations Climat – Météo DJ	VNO Zoonoses MTV	<i>Culex pipiens</i> <i>Culex restuans</i>	Abondance Virémie Période extrinsèque d'incubation (PEI) Transmission	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Linguistique :</b> anglais, français, espagnol</li> <li>■ <b>Chronologique :</b> 2006/01/01 à 2017/02/16</li> <li>■ <b>Géographique (optionnelle) :</b> Québec &gt; Canada &gt; Amérique du Nord &gt; Ailleurs</li> </ul>
Mots-clés en anglais	Meteorological indicators Temperature Rainfall Climate/Weather Degree-days	West Nile Virus (WNV) Zoonoses Vector-borne diseases	<i>Culex pipiens</i> <i>Culex restuans</i>	Abondance Viremia Extrinsic incubation period (EIP) Transmission	
Descripteurs MeSH	« Temperature » « Rain »; « Rainfall » « Climate » « Weather »	« West Nile Fever » « Zoonoses » « Disease Vectors »	« <i>Culex</i> » « <i>Culex/physiology*</i> » (Mesh)	« Infectious Disease Incubation Period » « Population density »	

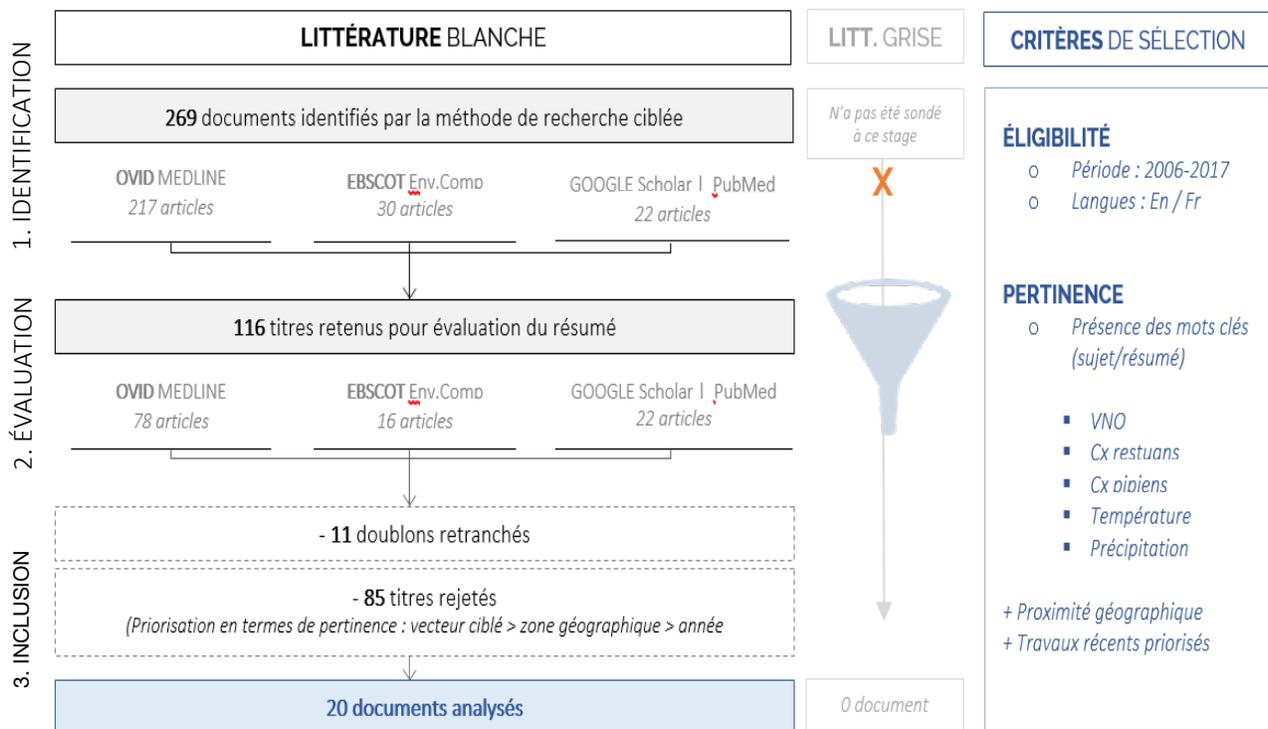
### 3.4 Bilan de la recension des écrits

Les recherches en langage contrôlé ont été effectuées le 16 février 2017, dans les champs de titre et de résumé des bases de données. Pour chacune des requêtes, les mots-clés de chaque concept étaient combinés à l'aide des indicateurs « OR » ou « AND ». Certains mots-clés auraient pu être liés à l'aide de marqueurs de proximité (0 à 2 espaces) afin de trouver les expressions recherchées avec plus de précision, mais ce ne fut pas nécessaire.

Au total, 269 documents ont été répertoriés dans la littérature scientifique à la suite de l'interrogation des différentes bases de données. La figure 1 détaille le nombre de résultats obtenus pour chaque stratégie et la sélection des articles selon nos critères de recherche.

Par ailleurs, soulignons que l'outil en ligne *Yale MESH Analyzer* ([mesh.med.yale.edu](http://mesh.med.yale.edu)) a également été utilisé pour générer rapidement des tableaux de synthèse des différents articles retenus (étape avantageuse au moment d'en faire l'évaluation pour la sélection). L'analyse de la pertinence s'est faite d'abord sur le contenu du titre et du résumé de l'article, puis sur l'ensemble de la publication.

**Figure 1 Bilan des résultats et du processus de sélection**



## 4 Concepts préliminaires

Le présent ouvrage fut d'abord et avant tout l'occasion de colliger et de synthétiser une grande quantité d'information au sujet de la biologie et de l'épidémiologie des vecteurs du VNO. Utiles à la compréhension des résultats issus de l'analyse des articles sélectionnés, ces concepts préliminaires seront présentés dans la section suivante.

### 4.1 Notions entomologiques, épidémiologiques et virologiques de base

#### 4.1.1 NOTIONS GÉNÉRALES

- Il est connu que « les moustiques sont sensibles au climat, car :
  - (a) leur taux de mortalité dépend de la température et de l'humidité;
  - (b) les taux de développement d'une étape du cycle de vie à la suivante (et donc la longueur de leur cycle de vie et leur abondance) dépendent de la température;
  - (c) leur taux de reproduction dépend du climat; et;
  - (d) l'activité de recherche d'hôte des vecteurs varie en fonction de la température et de l'humidité ». (Ogden, 2016).
- Il est établi que les populations de moustiques sont sensibles aux variations climatiques à long terme, et aux variations météorologiques à court terme (Wang, 2011).
- Les variabilités climatiques peuvent entraîner des changements temporels (saisonniers) et spatiaux (géographiques) des populations de vecteurs et des agents pathogènes (Stilianakis, 2016).

#### 4.1.2 *CULEX SPP.*

- Le VNO a été isolé dans au moins 65 espèces distinctes de moustiques en Amérique du Nord, mais ce sont les moustiques du genre *Culex* qui sont considérés comme les principaux vecteurs de la maladie internationalement (Peterson, 2013; Kramer, 2008). En territoire canadien, c'est principalement les températures froides qui limitent leur distribution vers le nord (Chen, 2012).
- *Culex pipiens* L. et *Culex restuans* Theobald sont les deux principaux vecteurs du VNO dans le Sud-est canadien (Wang, 2011). Bien que d'origines distinctes (*pipiens* européenne, *restuans* américaine), ce sont des espèces morphologiquement et taxonomiquement très difficiles à discriminer l'une de l'autre; elles sont aussi souvent considérées ensemble (« complexe *Culex* » ou *Cx. pipiens-restuans*) (Wang, 2011; Helbing, 2015).
- En Amérique du Nord, *Cx. pipiens/restuans* semble avoir une préférence pour les milieux urbanisés (Travinski, 2008; Deichmeister, 2011). Toutefois, le risque de transmission du VNO à l'humain semble varier en fonction du milieu (Schellenberg, 2006; Rocheleau, 2016).
- En termes d'abondance, les larves de *Cx. restuans* sont supérieures en nombre au printemps et au début de l'été, alors que celles de *Cx. pipiens* dominent vers la fin de la saison (phénomène appelé le « *Culex Crossover* »).
- Les populations de *Cx. pipiens* atteignent normalement un pic vers la moitié de la saison estivale (soit fin juillet, début août), moment à partir duquel elles deviennent numériquement prépondérantes comparativement à celles de *Cx. restuans* (Helbing, 2015; Wang, 2011)

- La durée de maturation d'un moustique du genre *Culex spp.* (de l'ovoposition à l'émergence adulte) dépend des disponibilités nutritionnelles, de la densité de population locale et des conditions météorologiques.  
Elle peut prendre entre 7 et 30 jours (moyenne entre 10-14 jours, relation non linéaire avec la température) (Wang, 2011; Crans, 2004).
- La durée de vie des adultes du genre *Culex spp.* varie de 11 à 92 jours. Elle varie considérablement en fonction de la température et des précipitations, avec une survie optimale aux températures situées entre 15-30 °C. (Andreadis, 2014; Jones, 2012).
- La diapause est un processus évolutif adopté par plusieurs espèces de moustiques pour survivre à l'hiver, mais les mécanismes empruntés divergent d'une espèce à l'autre. Chez *Cx. pipiens*, ce sont les femelles adultes (gravides) qui entrent en diapause à l'automne pour passer l'hiver et pondre au printemps. (Marini, 2016; Karki, 2016).
- Sur un site donné, il peut exister une forte hétérogénéité au niveau de l'abondance des moustiques, tant d'un mois à l'autre durant la saison (variation intra-annuelle), que d'une année à l'autre (variation interannuelle) (Marini, 2016).

#### 4.1.3 VIRUS DU NIL OCCIDENTAL

- Endémicité : Le VNO est endémique partout en Amérique du Nord (du Canada au Mexique, de New York à Los Angeles), ce qui implique une capacité de transmission et de réplication sur une large gamme de conditions climatiques et chez plusieurs espèces de vecteurs différents (Reisen, 2006).
- La saison principale de transmission du VNO chez l'humain en Amérique du Nord s'étend de juillet à octobre, avec des pics durant les mois d'août et de septembre (causée par une activité soutenue des vecteurs durant cette période) (Hubalek, 2006; INSPQ, 2016).
- Le seuil de température estimé pour l'amplification du VNO chez *Culex spp.* est de 14,3 °C. Aucun développement n'a lieu en dessous de cette température (Reisen, 2006).
- La période d'incubation extrinsèque (PIE) pour une transmission médiane est estimée à 109 degrés-jours (DJ) (au-dessus de 14.3 °C) (Reisen, 2006). En d'autres termes, il faut >8 jours consécutifs à 28 °C pour que 50 % des vecteurs présents soient capables de transmettre le virus (si présent).
- *Cx pipiens* transmettrait plus facilement le VNO aux humains que *Cx. restuans* (Helbing, 2015).
- Plusieurs espèces de *Culex* ne sont pas exclusivement anautogènes (comportement hématophagique partiel ou passager). Il existerait une variation du comportement (ex. : préférence trophique) chez certaines espèces de moustiques en fonction de la saison (moment, conditions) (Harbach, 2012). Ceci peut être lourd de conséquences dans le cycle enzootique dans un environnement avec des espèces réservoirs/passereles.

#### 4.1.4 INTERACTIONS

- L'épidémiologie des zoonoses est complexe. Ces maladies constituent un système dynamique au sein duquel interagissent les populations d'animaux réservoirs naturels (hôtes), les populations d'agents infectieux (ex. : arbovirus) et les populations de vecteurs (ex. : arthropodes).
- La transmission vectorielle relève des relations entre chacune des populations impliquées, lesquelles relèvent à leur tour des contacts écologiques entre celles-ci et du développement des agents infectieux chez leurs hôtes (Rodhain, 2008).

- Pour avoir transmission du virus il faut donc :
  - L'amplification du virus dans un réservoir-animal (rôle d'hôte amplificateur), où il atteint une virémie suffisante (la durée et l'intensité de la virémie varient en fonction de l'espèce d'hôte et du virus).
  - L'infection d'un vecteur compétent, au moment opportun (moustique sensible et permettant une répllication virale significative).
  - L'infection d'un hôte susceptible (amplificateur ou accidentel) (influencé par l'abondance de vecteurs présents, la proportion de repas sanguin pris par le vecteur, la PIE, etc.).
- Ceci dit, dans le contexte des zoonoses, il n'y a pas de proportionnalité entre :
  - la densité du vecteur et le contact humain-vecteur (les vecteurs ont des préférences trophiques et un rythme d'agressivité variable, influencés par des facteurs tant biotiques qu'abiotiques).
  - le contact humain-vecteur et l'intensité de transmission (influencée par la compétence vectorielle, l'âge moyen de la population de vecteurs, la PIE).
  - l'intensité de transmission et l'incidence de maladie (variable selon la réceptivité ou l'immunité de la population humaine).
  - l'incidence de la maladie et le taux de mortalité (sensibilité des individus, pathogénicité du virus, etc.).
- L'abondance de moustiques est l'un des déterminants clé d'une éclosion épidémique de zoonose, telle que le VNO (Wang, 2011). Par exemple, l'abondance de *Cx. pipiens* est associée à la transmission du VNO (Bolling, 2009; Kilpatrick, 2013). Par contre, il n'y a pas de proportionnalité directe entre la densité de moustiques et le risque de transmission (la présence du vecteur en lui seul ne suffit pas à la transmission du pathogène, le taux d'infection doit également être élevé par exemple) (Rodhain, 2007).
- Une certaine disparité est observée entre la distribution des vecteurs infectieux et l'incidence de cas humain, principalement à cause de disparités sociales et économiques, de la densité de population, la perception du risque, et les mesures de contrôle (Chen, 2012).

## 4.2 Température ambiante

---

### Définition :

Variable importante de météorologie et de climatologie, influençant directement le comportement et/ou le taux de développement de nombreux organismes (croissance température-dépendante). La température ambiante peut être mesurée en degrés Celsius (°C), ou en degrés-jour (DJ).

Les DJ de croissance représentent une mesure empirique utilisée pour calculer l'accumulation de chaleur et servent à estimer la durée d'un développement biologique en fonction de la température. Ils se calculent ainsi :

$$DJ = ((T_{\max} + T_{\min})/2) - T_{\text{base}} \quad \text{où :} \quad \text{la } T_{\text{base}} \text{ représente le seuil minimal de croissance} \\ \text{(en dessous duquel le développement est nul ou ralenti).}$$

Les seuils de développement (valeurs inférieures et supérieures) définissent la fenêtre de température nécessaire pour un développement optimal d'une espèce donnée (durée de temps nécessaire pour arriver à maturité). Ces valeurs sont indépendantes de la méthode utilisée pour calculer les DJ, et varient d'une espèce à l'autre.

Pour les populations de moustiques, le concept de DJ de croissance implique la quantité de chaleur accumulée nécessaire pour compléter leur développement d'un stade de leur cycle de vie à l'autre. Cependant, la façon dont la variable de température est calculée (valeur moyenne hebdomadaire ou mensuelle, valeur minimale ou maximale quotidienne) est significative (Chevalier, 2014).

### Pertinence en tant qu'indicateur :

Relation certaine. L'influence de la température sur la dynamique des populations de moustiques est bien établie. Effectivement, les moustiques sont incapables de réguler leur température corporelle (ectothermes, voire poïkilothermes) et, par conséquent, dépendent de la température de leur environnement pour leur croissance (Bustamante, 2010). À l'exception de conditions extrêmes, toutes les étapes de maturation du moustique se produisent plus rapidement à des températures plus élevées. Il existe des notions de temporalité (moment et durée observée) également non négligeables. La biologie virale est elle aussi souvent température-dépendante (avec des températures seuils propres).

### Seuils (variables selon les espèces et selon les études) :

- Le seuil minimal permettant le développement des *Culex* immatures est estimé à DJ >9 °C (développement nul sous ce seuil) (Wang, 2011).
- La longévité optimale des adultes du genre *Culex spp.* se situe entre 15-30 °C (survie restreinte lorsque la température ≥30 °C) (Andreadis, 2014).
- Le seuil de température estimé pour l'amplification du VNO chez *Culex spp.* est de 14,3 °C (amplification nulle sous ce seuil – valeur à valider chez d'autres espèces de *Culex*) (Reisen, 2006; Yoo, 2016; Kilpatrick, 2008-2010).
- La PIE pour une transmission médiane par *Cx pipiens* est estimée à 109 DJ (entre 14 et 30 °C, l'équivalent d'environ neuf jours consécutifs à 28 °C) (Reisen, 2006).
- La température était un meilleur prédicteur de l'abondance en prenant les valeurs des onze jours précédents la capture (Wang, 2011).

## 4.3 Précipitations

---

### **Définition :**

Quantité de pluie tombée dans un espace-temps défini. Elles sont mesurées en millimètres de pluie tombée.

### **Pertinence en tant qu'indicateur :**

#### **Relation probable, effets mitigés selon la littérature actuelle.**

Effets à retardement, environnement-dépendants. Importante notion de temporalité (intensité, durée, moment).

Le rôle que tiennent les précipitations sur la dynamique des populations de moustiques est moins bien défini. Par contre, puisque la pluie est nécessaire à la création et au maintien de gîtes larvaires (habitats propices à la croissance des premiers stades de vie des moustiques), il serait improbable qu'il n'existe aucune relation entre les deux (Yoo, 2016).

### **Seuils :**

Variables, selon les espèces et selon les études :

- Selon Wang *et al.*, (2011), la moyenne arithmétique des précipitations journalières et continues pendant les 35 jours précédant la capture de moustiques permettait d'estimer plus adéquatement l'abondance de moustiques (comparativement aux autres délais étudiés, relation non-significative en deçà de 24 jours).
- Des précipitations supérieures à 3,5 cm durant une même semaine semblent avoir un effet négatif sur l'abondance des moustiques (effet de lavage ou « flushing » des larves en développement hors de l'habitat) (Gardner, 2012).



## 5 État des connaissances au sujet des effets de la température et des précipitations sur *Cx spp.* et sur le VNO

À la lumière des concepts abordés dans la section précédente, l'état des connaissances sur l'effet de la température et des précipitations sur *Cx pipiens/restuans* et sur le VNO selon les articles sélectionnés sera présenté. L'ampleur des effets répertoriés sera d'abord définie, avant de détailler les effets individuels de ces deux indicateurs. Les tentatives de modélisation et certaines nuances non-négligeables devant être prises en considération seront également abordées.

### 5.1 Ampleur des effets répertoriés

---

La température ambiante, les précipitations et l'humidité relative peuvent avoir des répercussions sur un grand nombre de paramètres chez les vecteurs, allant bien au-delà des simples modifications comportementales. Du coup, il est fastidieux de circonscrire toute l'ampleur de cette emprise. Si un nombre imposant de paramètres environnementaux et météorologiques peuvent être considérés comme ayant une influence sur l'épidémiologie du VNO en général, la température et les précipitations sont progressivement devenues les favoris en tant que prédicteurs d'activités vectorielles et virales, puisqu'elles régissent étroitement leurs biologies respectives (vecteur et virus) (Ruiz, 2010; Landesman, 2007).

De façon très succincte, ces deux indicateurs peuvent avoir des effets directs et indirects sur la compétence vectorielle, la dynamique des populations de moustiques, la transmission virale, l'écologie des moustiques et le comportement des vecteurs et de leurs hôtes (Paz, 2015; Rosà, 2014). De façon plus détaillée, les paramètres suivants sont tous affectés par la température, les précipitations et/ou l'humidité relative :

#### Vecteur

- L'abondance des moustiques retrouvés (fortes variations intra - et intersaisonniers en fonction des conditions) (Marini, 2016).
- La distribution géographique des vecteurs et les espèces retrouvées (notions d'espèces invasives, compétition et pression sur une niche écologique partagée) (Rosà, 2014).
- Le taux de croissance et la longueur du cycle de vie (ex. : températures élevées associées à une augmentation du taux de croissance, et un développement larvaire plus rapide) (Ruiz, 2010; Wang, 2011).
- Le niveau d'activité et le comportement (ex. : distance de vol, agressivité, recherche de repas sanguin, diapause) (Ogden, 2016; Yoo, 2016; Rosà, 2014; Bellini, 2014).
- Le taux de reproduction (ex. : réduction du cycle gonotrophique à température élevée) (Ruiz, 2010).
- Le taux de survie/mortalité (survie optimale avec des températures situées entre 15-30 °C) (Andreadis 2014; Ogden, 2016).

#### Virus

- Le taux de réplication virale (amplification) effets favorables des températures élevées et de la sécheresse sur l'amplification virale. (Little, 2016; Paz 2015; Reisen 2006, Wang 2011).
- Le taux d'infection et l'efficacité de transmission virale à l'hôte aviaire (Paz, 2015).

- La PIE (valeur température-dépendante; corrélation inverse avec la température) (Ruiz, 2010; Ogden, 2016; Reisen, 2006; Paz, 2015; Stilianakis, 2016).
- La durée de vie infectieuse laquelle varie de façon exponentielle en fonction de la PIE (Reisen, 2006).
- Le taux de dispersion du VNO sur le territoire (Reisen, 2006).

### Hôte

- Le comportement et la phénologie saisonnière des hôtes aviaires (Paz, 2015).
- Les températures ambiantes affectent la proximité entre hôtes aviaires et vecteurs (contact oiseau-moustique), en influençant leur comportement, les migrations, etc. (Stilianakis, 2016).
- Il est possible d'imaginer une logique similaire pour le comportement humain (hôte terminal accidentel), par exemple lors des canicules estivales.

## 5.2 Effets de la température ambiante

---

Globalement, une augmentation de la température est associée à une augmentation du taux de croissance des populations et de l'abondance de moustiques (augmentation du taux de croissance larvaire, diminution de la durée du cycle gonotrophique, et donc augmentation du taux de reproduction) (Wang, 2011; Ruiz, 2010; Walsh, 08). La température tiendrait également un rôle important sur le niveau de l'activité vectorielle (agressivité, recherche de repas sanguin) et le taux de survie/mortalité des moustiques adultes (seuil optimal entre 15 et 30 °C) (Ogden, 2016; Karki, 2016).

Au niveau viral, un mercure à la hausse favorise une augmentation du taux d'infection (en raccourcissant la PIE et en augmentant le taux transmission) (Ruiz, 2010; Reisen, 2006; Paz, 2015; Ogden, 2016), du taux de dissémination (dispersion sur de nouveaux territoires), du taux de réplication virale, voire même du taux d'évolution du VNO (Ruiz, 2010; Johnson, 2013; DeGroot, 2014). Parallèlement, une relation positive statistiquement significative a été observée entre la température ambiante de l'air et la détection de cas humains de VNO (Stilianakis, 2016).

Ces notions sont nécessairement toutes interreliées, d'où l'intérêt de comprendre la biologie du vecteur et de l'agent pathogène. Par exemple, sous un climat trop froid, la PIE serait supérieure au temps moyen de survie d'un moustique adulte, si bien que la transmission virale ne serait pas possible et ce, malgré une présence positive du virus. En fait, selon les travaux de Reisen *et al.*, (2006), l'activité virale ne débiterait pas avant que la PIE diminue suffisamment de façon à ce que la femelle puisse transmettre le virus après deux cycles gonotrophiques (i.e. quand la femelle est à la recherche d'un 3<sup>e</sup> repas sanguin). Or, si les conditions météorologiques ne sont pas favorables à la réplication virale (ex. : température suffisamment élevée pour infection du vecteur, mais sous-optimale pour transmission), la femelle infectée risque de mourir avant de pouvoir transmettre l'arbovirus (PIE trop longue à température trop faible, notion de « *survivorship* » ou de « survie post-infection ») (Reisen, 2006).

Le taux de dispersion du VNO sur de nouveaux territoires est associé à une température moyenne supérieure aux valeurs saisonnières normales (basé sur les cas humains rapportés aux États-Unis). Similairement, on observe une amplification virale en présence de températures normales ou supérieures aux normales, et inversement, un délai ou un ralentissement de l'activité virale avec des températures inférieures aux normales saisonnières (surtout sur les territoires situés plus au nord des États-Unis) (Reisen, 2006).

Des températures supérieures aux valeurs saisonnières annuelles sont également associées à une augmentation de la probabilité d'une incidence de cas humains de VNO plus élevée que la normale (nationalement et dans la plupart des régions des États-Unis) (Hahn, 2015).

### 5.3 Effets des précipitations

Le rôle des précipitations est particulièrement difficile à cerner à partir des études existantes. Il en est ainsi à cause des effets moins directs qu'elles ont sur la biologie des moustiques et des discordances existantes d'une étude à l'autre (caractéristiques écologiques non comparables, espèces différentes étudiées, disparités méthodologiques, notamment au niveau des échelles spatiales et temporelles choisies.). Effectivement, contrairement à la température, l'influence du niveau de précipitations sur le cycle enzootique du VNO semble sensiblement plus variable. Chen *et al.*, lui attribue d'ailleurs un rôle de « variable de distorsion » pour son effet sur l'association entre la température, l'abondance et le taux d'infection des vecteurs au VNO (Chen, 2012).

En réalité, la force de la relation entre abondance de *Culex* et les niveaux de précipitations est plus faible comparativement à d'autres indicateurs. De plus, cette relation n'est pas nécessairement linéaire et semble être temporellement déphasée (Karki, 2016). Malgré cela, elles représentent l'un des facteurs clés de la météorologie permettant d'estimer l'abondance de moustiques d'une saison à l'autre, la quantité de pluie tombée déterminant, du moins en partie, la quantité et la qualité des habitats disponibles pour le développement larvaire des moustiques de type *Culex spp.* En fait, contrairement à d'autres espèces se reproduisant en eaux libres (eaux de crues), ces espèces (« *container-breeder* ») sont très susceptibles à l'effet de « rinçage » (débordement, ou « *flushing effect* »), causées par de fortes précipitations sur une petite période de temps (associé à une dilution des nutriments, une dispersion des larves hors de leur habitat, etc.) (Yoo, 2016; Wang, 2011; Rosà, 2014). Inversement, trop peu de précipitations entraînent un nombre réduit d'habitats propices à la ponte. Le taux de survie serait aussi affecté négativement par des précipitations trop abondantes (ex. : supérieures à 35 mm durant une même semaine) (Jones, 2012; Gardner, 2012).

Des accumulations inférieures aux moyennes saisonnières (cas de sécheresse, avec conditions chaudes et sèches) pourraient faciliter la croissance populationnelle à d'autres niveaux, par l'entremise d'une diminution de la prédation et une concentration des ressources. En réalité, le manque de précipitations favorise l'eutrophisation des plans d'eau, les rendant d'autant plus attractifs pour les moustiques du genre *Culex spp.* (Johnson, 2013). Les conditions de sécheresse favoriseraient donc la stabilisation de l'habitat larvaire pour ces espèces (notion de capacité de charge larvaire, CCL). Elles encourageraient la congrégation des hôtes aviaires et des moustiques autour des sources d'eau disponibles, favorisant ainsi une amplification enzootique du VNO (Shaman 2011; Little, 2016; Deichmeister, 2011). Les conditions de sécheresse ont également été associées avec une augmentation significative du nombre de *Culex spp.* gorgés de sang capturé (niveau d'activité accru), de la compétence et du taux d'infection de la communauté de vecteurs, comparativement à une saison plus humide et plus fraîche. (Johnson, 2013). Parallèlement, mentionnons qu'une association négative statistiquement significative a été observée entre l'humidité relative et la détection de cas humains de VNO (Stilianakis, 2016).

Soulignons brièvement que d'importantes nuances interspécifiques doivent également être prises en considération.

## 5.4 Portrait global des relations entre les deux indicateurs

Le tableau 5 synthétise les informations précédemment présentées au sujet des relations entre la température, les précipitations et les paramètres épidémiologiques/entomologiques associés au VNO.

**Tableau 5 Synthèse des informations concernant les effets des variations de température et des précipitations sur l'épidémiologie du VNO**

	↑ Température	Δ Précipitations
<b>Vecteur</b>	<p>↓ Durée de cycle de vie</p> <p>↓ Durée de cycle gonotrophique</p> <p>↑ Taux de croissance larvaire (Ruiz, 2010; Wang, 2011; Walsh, 2008)</p> <p>↑ Abondance (Ruiz, 2010)</p> <p>↑ Activité vectorielle (Ogden, 2016)</p> <p>Δ Taux de survie / Mortalité (Ogden, 2016; Karki, 2016)</p> <p>↑ Conditions hivernales/printanières =</p> <p>↑ abondance en été (Walsh, 2008)</p>	<p>↑ Précipitations</p> <p>↑ abondance (effet retardé) (Paz, 2015) (Δ habitats larvaires, Δ dilution, Δ <i>flushing</i>)</p> <p>↓ Taux de survie (adultes) (Jones, 2012; Gardner, 2012)</p> <p>↓ Capacité de charge larvaire (CCL)</p> <p>↓ Précipitations (sécheresse)</p> <p>↑ Abondance (Little, 2016) (↓ prédation, ↑ eutrophisation)</p> <p>↑ Activité vectorielle (= ↑ taux de capture)</p> <p>↑ Rapprochement hôte/vecteur = ↑ amplification enzootique (Shaman, 11; Little, 16; Deichmeister, 11)</p>
<b>Virus</b>	<p>↑ Taux de répllication virale (Ruiz, 2010)</p> <p>↓ PIE (Ogden, 2016; Ruiz, 2010, Reisen, 2006; Paz, 2015)</p> <p>↑ Taux évolutif (DeGrootte, 2014; Johnson, 2013; Ruiz, 2010)</p> <p>↑ Taux d'infection/ ↑ Transmission/ ↑ Amplification (DeGrootte, 2014; Paz, 2015, Reisen, 2006)</p> <p>↑ Incidence de cas humains (Stilianakis, 2016; Hanh, 2015)</p>	<p>↓ Précipitations (sécheresse et totales annuelles)</p> <p>↑ Amplification virale (Little, 2016) ↑ Incidence (Cas VNO Humains)</p> <p>↑ Précipitations</p> <p>↑ Taux d'infection (effets retardés) (DeGrootte, 2014)</p>
<b>Hôte</b>	<p>Δ Modifications comportementales</p>	<p>Δ Modifications comportementales (par exemple : rapprochement hôte/vecteur, voir ci-haut)</p>

Scénario optimal pour une forte abondance de moustiques durant la saison<sup>4</sup> :



*Conditions hivernales clémentes, hiver court*

↳ *Températures et précipitations printanières élevées*

↳ *Températures élevées, faibles précipitations, faible facteur éolien*

↳ *Abondance d'aliments et de gîtes larvaires, faible compétition*

↳ *Abondance vectorielle*

### **Effets à retardement des précipitations :**

Diminution de l'activité vectorielle le jour même, mais contribution à l'augmentation de l'abondance relative dans les jours/semaines suivants les précipitations.

## **5.5 Notions de synchronisme et de temporalité**

Un effet à retardement des conditions météorologiques, particulièrement en ce qui concerne les niveaux de précipitations, est observé sur les variations hebdomadaires de l'abondance de moustiques (positivement et significativement corrélées aux mesures climatiques antécédentes) (Yoo, 2016; Ruiz, 2010; Travinski, 2008; Soverow, 2009). Il a été souligné que ce décalage est probablement relié au fait que les précipitations affectent davantage le stade larvaire, donc beaucoup plus en amont dans le cycle. Cela dit, l'effet retardé entre les précipitations et le taux d'infection chez le moustique, ainsi que la disparité au sein des observations interannuelles, indiquent probablement une relation plus complexe et plus variable qu'avec la température par exemple (on détecte tout de même certaines similarités en amplitude entre l'abondance de moustique et la température) (Ruiz, 2010; Yoo, 2016).

### **Fenêtre temporelle et notions saisonnières**

En prenant ceci en considération, il faut comprendre que la fenêtre de temps étudiée joue un rôle critique sur la pertinence de l'utilisation de la température et des précipitations comme indicateurs pour le VNO (obtention de différentes informations à différents moments) (Rosà, 2014; Marini, 2016). De surcroît, au-delà de la présence et de l'intensité des observations, le moment de la survenue, le délai observé entre une observation et ses effets, ainsi que la combinaison des événements (effets synchronisés et/ou cumulatifs) sont deux notions modulant également l'effet de ces deux indicateurs sur l'épidémiologie du VNO.

Par exemple, les variations climatiques saisonnières (fin d'hiver, printemps, début d'été) pourraient tenir un rôle important sur la dynamique des populations de *Culex spp.* plus tard dans l'année :

### **En termes de températures :**

- Des conditions hivernales clémentes (ou un hiver plus court) et/ou des températures printanières plus élevées pourraient précipiter la saison de reproduction, et conséquemment l'allonger en durée totale, et favoriser l'abondance d'adultes (\*significativité mitigée) (Marini, 2016; Walsh, 2008; Rosà, 2014).

<sup>4</sup> À noter : aucune proportionnalité ne semble exister entre présence/abondance/densité de vecteurs et risque de transmission (Rhodain, 2006).

- Une quantité moindre de jours froids et une température moyenne plus chaude en hiver seraient également associées à une incidence accrue de cas humains de VNO dans les régions plus chaudes des États-Unis, probablement par influence sur la biologie du vecteur, mais également par répercussion sur les comportements migratoires et reproductifs des hôtes aviaires (observations non confirmées en territoires plus nordiques, où les conditions hivernales sont réellement plus rigoureuses) (Chung, 2013; Winters, 2009; Ruiz, 2010; Hahn, 2015).
- Les niveaux de températures rétrospectives (« lagged conditions », remontant jusqu'à quatre semaines avant la capture) seraient positivement associés à l'abondance de moustiques (Karki, 2016).
- À l'inverse, des températures élevées durant l'été ou en fin de saison diminueraient la taille de la population en accélérant le taux de mortalité des adultes (augmentation de la durée de la saison, mais baisse en abondance totale) (Marini, 2016; Walsh, 2008; Rosà, 2014).

#### **En termes de précipitations :**

- Des accumulations printanières au-delà des valeurs saisonnières retarderaient et raccourciraient la durée de la saison, mais augmenteraient l'abondance totale plus tard en saison. De fortes précipitations en fin de saison seraient associées à une prolongation de la saison (Rosà, 2014).
- La taille de la population de *Cx pipiens* serait positivement associée au nombre de jours pluvieux durant les trois premiers mois de l'année (Italie) (Rosà, 2014).

#### **En termes de transmission :**

- Un taux plus élevé d'infection des moustiques au VNO serait observé à des températures plus chaudes, une humidité élevée et de fortes précipitations dans les semaines précédant la capture. En effet, les vagues de VNO observées dans le Sud-est américain (2012) auraient été associées avec des précipitations hivernales/printanières supérieures aux normales saisonnières, suivies de conditions estivales chaudes et sèches (DeGroot, 2014).
- Des conditions printanières clémentes (plus chaudes et plus sèche en fin d'hiver et en début de printemps) seraient associées à des taux d'infection des moustiques plus élevés en fin d'été et début d'automne (prolongation de la saison et de l'activité vectorielle). Ces conditions en début de saison seraient également associées à une augmentation de la distribution et du taux d'infection annuel des vecteurs (côte est américaine, juin-juillet) (Little, 2016; Johnson, 2013; Lockaby, 2016).
- En d'autres termes, le déroulement du printemps influencerait de façon tangible la présence, l'abondance, la distribution du VNO chez son vecteur plus tard en saison. Un fort pourcentage de la variation hebdomadaire du taux d'infection vectorielle peut être estimé par les conditions météorologiques antérieures dans un secteur donné (Ruiz, 2010). Ainsi, malgré la vaste gamme de paramètres impliqués dans les éclosions de VNO, l'utilisation de données climatiques antérieures semble être utile pour prévoir les tendances saisonnières de l'activité virale et des populations de vecteurs (Rosà, 2014).
- La relation entre taux d'infection et conditions printanières antérieures était corrélée pour certaines années. Dans certaines études, ceci vient accentuer à nouveau le rôle plus ambigu que tiendraient l'humidité relative et les niveaux de précipitations (Ruiz, 2010).
- Les profils spatiotemporels fins (à petite échelle) de précipitations et de température ambiante sembleraient avoir un impact constant et significatif sur le moment et l'emplacement de l'augmentation du taux d'infection des moustiques. La température a été proposée comme principal indicateur pour expliquer la majeure partie des différences inter-saisonnières observées (Ruiz, 2010).

- Plusieurs études ont déjà mis en évidence comment la variabilité interannuelle à long terme pourrait également influencer la saison (en termes de début et de durée) et l'intensité de la transmission du VNO (Ruiz, 2010; Landesman, 2007). Ruiz *et al.*, indiquent que le taux d'infection vectorielle serait associé négativement avec les niveaux de précipitations de l'année précédente, appuyant l'idée d'incorporer des données hors-saison ou rétrospectives de plusieurs années dans les modèles prédictifs (Ruiz, 2010).

## 5.6 Modélisation

---

Comme plus d'une décennie s'est écoulée depuis le premier recensement du VNO en Amérique du Nord, une grande quantité de données entomologiques et épidémiologiques longitudinales est aujourd'hui disponible (Ruiz, 2010). Dans ce contexte, le développement de modèles statistiques prédictifs apparaît comme un outil judicieux en termes de santé publique pour prévoir différents paramètres entourant l'épidémiologie du VNO. Par exemple, la PIE et le taux de réplication virale chez un vecteur peuvent être estimés par un modèle de températures en DJ, généré à partir de données d'infections expérimentales (infections contrôlées en laboratoire) et des fonctions de régressions (Reisen, 2006). Dans un même ordre d'idées, avec les outils informatiques de type SIG, il devient intéressant d'essayer de mettre en relation plusieurs patrons d'ordre écologique et entomologique et ainsi tenter de prédire les tendances sous-tendant les cycles du VNO.

L'utilité des données environnementales issues de la télédétection à titre de prédicteurs d'abondance a d'ailleurs déjà été mise en évidence (Chuang, 2011; Yoo, 2016). Toutefois, il demeure assez difficile de développer un modèle spatiotemporel suffisamment robuste pour prédire avec précision l'abondance des vecteurs, ou la quantité d'infections humaines sur une période donnée. En effet, les tentatives de modélisation des effets des facteurs environnementaux sur la question ont fourni des résultats mitigés, voire contradictoires, et sont donc également limitées en termes d'inférences. La forte disparité des conclusions (variant selon l'emplacement géographique, les vecteurs étudiés, la littérature existante, etc.) rend difficile toute forme de consensus en la matière.

Des études portant notamment sur des régions géographiques distinctes arrivent à des conclusions différentes concernant les associations entre les variables climatiques, l'utilisation des terres et le risque de maladie. Les modèles proposés restent imparfaits et sans valeur extérieure, et les résultats obtenus sont inconsistants, rendant toute généralisation difficile (Ruiz, 2010). Par exemple, le taux de précipitations annuel de l'année précédant la capture de moustiques a été associé positivement au VNO chez l'humain dans l'Est américain, mais négativement dans l'Ouest (DeGroot, 2014; Landesman 2007).

À titre de référence, le tableau 6 fournit un bref aperçu de la disparité pouvant exister au niveau des conclusions obtenues dans différents états américains durant une période de temps similaires (adapté de Deichmeister *et al.*, 2011) :

**Tableau 6 Exemple de disparités de conclusions tirées de différentes études utilisant des SIG (abondance de vecteurs du VNO vs. conditions climatiques et utilisation des sols)**

États américains	Milieus	Conclusions	Références
Nord-Ouest du Texas	Ruraux et agricoles	L'abondance élevée de vecteurs était liée aux fortes précipitations, aux hautes températures et à la couverture des sols (canopée)	(Bolling <i>et al.</i> , 2005).
Washington (Seattle)	Urbains ou suburbains	L'abondance élevée des vecteurs moustiques était corrélée à la température, mais pas aux précipitations	(Pecoraro <i>et al.</i> , 2007).
Rhode Island	Urbains ou suburbains	Activité supérieure du VNO a été associée aux fortes précipitations uniquement	(Takeda <i>et al.</i> , 2003).
Colorado, Louisiane, Pennsylvanie, Nebraska	Agricoles	Corrélations positives entre l'infection humaine au VNO, les températures élevées et l'utilisation des terres agricoles	(Miramontes <i>et al.</i> , 2006).
Géorgie	Urbains ou agricoles	L'urbanisation était liée au risque du VNO, mais pas l'agriculture	(Gibbs <i>et al.</i> , 2006).

Ces disparités dans les résultats obtenus peuvent probablement être expliquées par la complexité des zoonoses, qui comportent trop de variables difficilement circonscrites, et qui sont abordées différemment d'une étude à l'autre. Il existe des interactions complexes entre chaque joueur (climat, dynamique populationnelle des vecteurs, couverture des sols et superficie en couvert végétal, disponibilité en repas sanguin, intensité des mesures de contrôle des moustiques, etc.), et notre compréhension de ces interactions serait peut-être encore trop limitée (Yoo, 2016).

Cela dit, si la modélisation représente une avenue ardue, certains modèles plus poussés arrivent à faire des prédictions significatives en fonction des conditions météorologiques et hydrologiques. Par exemple, Little *et al.*, (2016) ont développé un modèle (à partir de plusieurs années de données entomologiques, progressivement validées avec des données prospectives) fournissant des informations épidémiologiques temporelles (à quel moment il y aura plus d'activité VNO) et spatiales (où le taux infectieux sera le plus élevé). Bien que de façon plus individuelle plusieurs prédictions n'arrivent pas à dessiner les valeurs observées pas de façon significative et que le développement d'un tel modèle nécessite un niveau d'expertise non négligeable, cette étude suggère que l'information climatique en temps réel pourrait être utilisée dans un modèle statistique pour générer des prédictions sur l'infection par le VNO de moustiques du genre *Culex* (et donc avant que le risque de transmission à l'humain soit significatif) (Little, 2016).

## 5.7 Nuances importantes

Tel que soulevé précédemment, il serait invraisemblable de prétendre pouvoir capturer toute la complexité des relations existantes entre arboviroses et variables climatiques en un seul ouvrage. Effectivement, plusieurs facteurs influencent l'épidémiologie du VNO, au-delà de la transmission et la distribution, notamment à cause des interactions complexes qui existent entre l'agent pathogène (souches virales), les vecteurs (espèces de moustiques compétents), les hôtes (oiseaux, humains, chevaux et autres vertébrés), et l'environnement (climat, météo, etc.). De surcroît, l'imposante quantité de fines nuances rend difficile toute généralisation à plus grande échelle. Or, il est important de prendre ces informations en considération pour nuancer et comprendre les conclusions avancées.

### 5.7.1 NUANCES INTERSPÉCIFIQUES

Les différences interrégionales substantielles qui existent en termes de relations entre l'apparition de cas de VNO et certaines variables climatiques, démographiques ou environnementales seraient reliées à l'écologie de l'espèce vectrice principale de chaque région. Autrement dit, les relations observées varient selon les régions probablement à cause des conditions climatiques différentes, mais également parce que le vecteur principal n'est pas le même partout sur le territoire (ex. : *Cx. tarsalis* du côté Pacifique, *Cx. pipiens/restuans* du côté nord-Atlantique, et *quinquefasciatus* dans le Sud-Américain) (motif sur lequel s'appuyait d'ailleurs notre décision de concentrer nos travaux sur *Culex pipiens* et *restuans* au Québec) (Karki, 2016; DeGroot, 2014).

Or, il existe des différences biologiques interspécifiques non négligeables sur le territoire québécois devant être prises en considération. Bien que la majorité des études les considèrent souvent comme une seule espèce (« *Culex complex* », principalement parce qu'elles partagent beaucoup de similarités, tant morphologiques, comportementales, écologiques qu'épidémiologiques), *Culex restuans* est une espèce native de l'Amérique, alors que *Culex pipiens* est une espèce immigrante européenne, dont la présence en Amérique est documentée à partir des années 1600 (Helbing, 2015). Malgré ces similarités, il existe des nuances notoires entre les deux espèces, notamment au niveau de la dynamique de leurs populations distinctives.

Ces deux espèces montreraient également des réponses distinctes aux facteurs climatiques. Contrairement aux températures, les espèces semblent répondre différemment aux précipitations. Par conséquent, dans un secteur où plusieurs vecteurs coexistent, des précipitations supérieures aux valeurs saisonnières peuvent pousser la relation dans les deux directions (favorisant une espèce au détriment d'une autre, par exemple), rendant les estimations d'autant plus difficiles à produire (Hahn, 2015). Par exemple, Helbing *et al.*, (2015) ont obtenu des corrélations indiquant que les populations des deux espèces seraient bel et bien reliées aux températures et précipitations, mais qu'elles réagissaient de façons distinctes (grossièrement : *pipiens* positivement, *restuans* négativement). En effet, *Cx pipiens* montrait dans leur étude une réponse positive aux températures quotidiennes, aux degrés-jours cumulatifs (DJC), aux précipitations cumulées durant la saison. Par opposition, *Cx restuans* montrait une réponse négative aux DJC et aux précipitations cumulatives. Ces nuances biologiques et éthologiques pourraient expliquer le « *cross-over* » observé en saison. (Helbing, 2015).

Similairement, l'abondance de *Cx. pipiens* répond généralement négativement à de fortes précipitations (probablement à cause du « flushing » et du facteur de dilution des nutriments), alors que *Cx tarsalis* (surtout retrouvé dans l'Ouest américain et les prairies canadiennes) y répond favorablement (probablement parce que les pluies contribuent à former des habitats propices pour la reproduction dans les milieux ruraux) (Hahn, 2015; Ruiz, 2010). Des précipitations totales annuelles

inférieures aux valeurs saisonnières furent également associées une augmentation de la probabilité d'une incidence supérieure à la normale de VNO humain, mais seulement dans la portion atlantique du continent américain – la relation inverse étant observée du côté Pacifique (ici aussi, divergences probablement fondées sur la différence en espèces endémiques).

Dans le même ordre d'idées, mentionnons que différentes zoonoses réagiront différemment aux changements à long terme de températures et de précipitations, ainsi qu'à la variabilité accrue du climat et aux événements météorologiques extrêmes qui sont attendus dans le cadre des changements climatiques (Ogden, 2016).

### 5.7.2 NOTIONS D'ÉCHELLE GÉOGRAPHIQUE

#### Importance de la couverture spatio-temporelle :

- Le choix de l'échelle spatiale et temporelle des données météorologiques et géographiques employées peut influencer grandement les conclusions tirées : des données trop grossières pouvant éclipser certaines tendances plus fines (Little, 2016; Ruiz, 2010). L'utilisation des données météorologiques locales à plusieurs sites de surveillance (à petite échelle) et l'intégration des données sur les infections de moustiques provenant de nombreuses sources (sur cette même petite échelle idéalement) pendant plusieurs années consécutives sont donc décisives pour garantir la solidité des conclusions tirées (question de résolution spatiale) (Ruiz, 2010). Cela dit, la disponibilité (limitations techniques ou financières) et l'intégrité (présence de données manquantes) de ces données posent souvent un frein à leur utilisation pratique (Yoo, 2016).

#### Importance de l'échelle de la zone d'étude (microclimat vs. régional vs. national) :

- L'existence de variations régionales significatives suggère qu'il ne serait pas pertinent de s'attarder aux associations climatiques et épidémiologiques à une échelle nationale. La modélisation à l'échelle régionale offre des estimations plus précises que celle à l'échelle nationale (Hahn, 2015), et il serait alors plus judicieux d'utiliser des frontières naturelles (divisions des régions sur des fondements écologiques et météorologiques, reflétant plus adéquatement la distribution et biologie des hôtes/vecteurs) plutôt que des frontières politiques pour développer des estimations/tendances (Hahn, 2015). Étant donné le rôle prépondérant que tient la température dans les différents modèles avancés, il pourrait devenir important de prendre en considération les variations microclimatiques à petite échelle (Ruiz, 2010).
- En effet, les variations spatiales de la température même sur de petites distances (variations locales) peuvent avoir des répercussions non négligeables sur la transmission vectorielle, puisque la durée de vie infectieuse varie de façon exponentielle en fonction de la PIE. Par exemple, une différence de 1,3 °C entre une zone côtière et une zone intérieure augmente la PIE de 12,4 à 17,9 jours, réduisant la durée de vie infectieuse (survie infectée) de 2,6 à 1,4 jours. En d'autres termes, la fenêtre temporelle durant laquelle il y a possibilité de transmission est réduite de près de la moitié sur la zone côtière, plus fraîche (données chez *Cx tarsalis*) (Reisen, 2006).
- Envisager l'emploi de données locales serait intéressant mais des failles techniques non-négligeables pourraient toutefois limiter leur utilisation (manque de données suffisamment détaillées, résolution trop faible, accès, coûts, etc.). De plus, la variabilité à l'échelle locale (en partie due aux températures) tiendra un rôle capital sur la façon dont la surveillance et l'interprétation des résultats obtenus seront perçues (remise en doute de la validité externe de l'ensemble des relations mises en évidence dans les articles scientifiques, ex. : peut-on prendre pour acquis qu'une relation statistiquement significative entre la température ambiante et la détection de cas humains de VNO sera aussi significative et donc extrapolable au Québec?).

### 5.7.3 IMPORTANCE DE LA LIGNÉE VIRALE

Différentes souches virales peuvent réagir différemment à la température (Reisen, 2006). La souche 2 (WNV H442, Afrique du Sud), qui a une longue histoire évolutive auprès de ses espèces vectrices, montre une forte capacité répliquative et de transmission chez *Cx univittatus* dès 14 °C et 30 dpi. Inversement, la souche 1a (WNV NY99, New York), qui n'est pas aussi bien adaptée auprès des vecteurs responsables de sa dissémination, ne montre pas une aussi bonne répliquative chez *Cx pipiens* (la moitié des femelles positives, à  $\geq 18$  °C, après 32 dpi). Comme cette souche ne se réplique pas chez les *Cx pipiens* en deçà de 10 °C, ceci suggère que la température seuil pour la répliquative virale se trouve entre 10 et 14 °C (Reisen, 2006). La lignée 2 se réplique beaucoup plus vite à basse température (transmissible à  $\geq 14$  °C) que la lignée 1a (répliquative plus lente à basse température, se retrouvant plutôt dans les zones au Sud). Autrement dit, la souche américaine nécessite une période d'incubation chaude dans son hôte (moustique) pour avoir une répliquative et une transmission efficace.

### 5.7.4 AUTRES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX D'IMPORTANCE

Stilianakis *et al.*, ont démontré qu'en plus de la température ambiante et des précipitations, l'utilisation d'autres paramètres météorologiques pouvant influencer l'épidémiologie du VNO peut également être pertinente. C'est le cas notamment de (a) la température du sol, (b) l'humidité relative, (c) le contenu du sol en eau et (d) le facteur éolien. Cela dit, ces auteurs arrivent à des conclusions parfois contradictoires à celles présentées dans la littérature, possiblement parce qu'il est difficile de démêler l'effet individuel de chaque facteur, étant donnée la complexité des cycles enzootiques impliqués. Ces auteurs décrivent une association négative entre la force du vent et la présence de vecteurs infectés dans les pièges déployés. De forts vents sont également reliés à des probabilités plus faibles d'obtenir un repas sanguin et donc moins de cas humains d'infection (relation statistiquement significative négative entre la vitesse du vent et la détection de cas humains de VNO) (Stilianakis, 2016).

La température du sol aurait des effets sur le développement larvaire (réduction du temps de génération), alors que la température de l'air aurait un impact plutôt sur la PIE. La température du sol et de l'air serait associée à un nombre considérable de cas humains rapportés, faisant donc d'eux de bons candidats à titre de prédicteurs épidémiques (Stilianakis, 2016).

La photopériode tient également un rôle substantiel au niveau comportemental chez les *Culex* (en termes d'activité, d'agressivité, d'induction de la diapause, etc.) (Yoo, 2016).

L'accumulation de neige pourrait elle aussi tenir un rôle, en permettant d'atteindre une humidité au sol suffisante en début de saison pour soutenir la population de moustiques (la température serait alors le facteur limitant) (Hahn, *et al.*, 2015).

### 5.7.5 AUTRES PARAMÈTRES NON MÉTÉOROLOGIQUES D'IMPORTANCE

Plusieurs autres paramètres non climatiques sont également étudiés à titre d'indicateurs pour documenter l'épidémiologie du VNO. Voici quelques-unes des variables communément utilisées :

- La proximité du couloir riverain.
- La présence/proximité des infrastructures de drainage, système de débordement d'égouts/de recueillement des eaux de pluie positivement associés à l'abondance de *Culex pipiens-restuans*; décrit comme contributeurs d'abondance significatifs (Deichmeister, 2011).

- La composition et la densité de la végétation tiennent un rôle sur la dynamique des populations de *Culex*, la présence d'arbres serait positivement associée avec la densité d'hôtes aviaires (lieu de nidification), les arbustes peuvent fournir refuge et nourriture aux adultes, etc. (Rosà, 2014; Lockaby, 2016; Chuang, 2011).
- La composition et la densité du couvert forestier/canopée (ex. : « forest patch size » et « percent pine composition ») associées négativement avec l'indice vectoriel (Lockaby, 2016).
- La proportion de surfaces imperméables, le niveau de drainage/ruissellement, et les paramètres topographiques (pente et l'élévation du terrain) effets médiateurs des précipitations sur les sols, du couvert végétal, et des bassins de captage urbains, etc. (Ruiz, 2010).
- La démographie, la densité urbaine, routière et résidentielle (« building footprint »).
- L'utilisation des terres (agricoles, urbaines, etc.) (Ruiz, 2010; Lockaby, 2016).
- Certains facteurs socioéconomiques (incluant la proportion de foyers à faible revenu, et les bâtiments construits avant 1960, influençant par exemple le nombre de gîtes larvaires associés positivement avec l'indice vectoriel (Lockaby, 2016).
- La disponibilité en repas sanguin (présence et type d'hôtes disponibles) (Yoo, 2016).
- Le niveau d'intervention humaine (intensité des mesures de contrôle des moustiques, campagne de sensibilisation, épandage de larvicides, etc.) (Yoo, 2016).
- L'eau environnementale (score NDWI) serait positivement associée au début précoce de la saison et à une extension de sa durée (Rosà, 2014).
- Le niveau d'immunisation (hôtes réservoirs et humains) (DeGroot, et al., 2014).
- Les effets aléatoires sur les probabilités de capture.
- Certaines mesures/scores géographiques (télédétection/GIS) :
  - Average hydric soils score
  - Average available water storage score
  - Taux de couverture végétale (TCV)
  - Stress végétal/Stress hydrique/Évapotranspiration
  - Temperature/Vegetation Index (TVX) = Indice Température/Végétation (ITV)
  - Global Environmental Monitoring Index (GEMI)
  - Interaction Sol-Végétation-Atmosphère (SVAT)
- À noter : Certains travaux utilisent des valeurs de capture arrondies (« smoothed value »), en faisant la moyenne avec les valeurs de la semaine précédente et de la semaine suivante), afin de réduire les effets aléatoires sur les valeurs enregistrées (ex. : phase lunaire) (Wang, 2011).

Tel que précédemment mentionné, bien qu'une relation significative entre le VNO et chacune de ces variables a été mise en évidence dans au moins une étude, la nature et l'ampleur de cette association (positive/négative, forte/faible/négligeable) sont rarement consistantes. Ces incohérences peuvent en grande partie être expliquées par les différences méthodologiques entre les études (facteurs climatiques pris en considération, espèces de moustique ciblées, emplacements géographiques, résolution temporelle et spatiale hétérogène, etc.) (Ruiz, 2010).

## 6 Constats sur la pertinence et l'utilité de ces deux indicateurs

Il ne fait aucun doute qu'il existe une certaine relation entre les vecteurs du VNO (*Culex pipiens/restuans*), les niveaux de précipitations et les températures ambiantes. Ces deux paramètres météorologiques pourraient vraisemblablement être utilisés à titre d'indicateurs, avec certaines nuances. En effet, si plusieurs relations sont indéniables, il reste encore beaucoup à faire afin de départager certaines interactions en jeu, et pouvoir utiliser ces données efficacement dans une optique de surveillance.

### En résumé :

- Températures : Rôle inéquivoque, relation directe, indicateur fort.
- Niveaux de croissance et d'activité température-dépendants (relation positive avec les températures élevées), avec tout de même une fourchette de température optimale (minimale et maximale, au-delà desquelles le développement/survie est nul ou ralenti).
- Précipitations : Rôle probable, relation indirecte, effets retardés et difficiles à discerner, mais non négligeables.
- Effet négatif sur le comportement et le niveau d'activité journalier des moustiques, mais tiendrait un rôle déterminant sur la dynamique populationnelle des semaines suivantes (à cause de leur impact au niveau des habitats larvaires). Effets retardés.

De façon globale, les travaux sélectionnés en revue nous permettent d'affirmer que :

### Températures :

- La température est un indicateur fort et sa relation avec les vecteurs du VNO est beaucoup plus linéaire que celle des précipitations.
  - Étant donné l'écologie température-dépendante des moustiques, les variations de mercure sont sans équivoque très importantes pour leur cycle de vie, et donc très utiles pour prévoir la dynamique de population saisonnière ou annuelle.
  - Bien que cette relation soit évidente et bien documentée, le nombre élevé de variables et de facteurs confondants impliqués fait en sorte que les modèles et les outils actuellement disponibles sont loin d'être parfaits.

### Précipitations

- Il serait étonnant que les précipitations n'aient aucune influence sur l'épidémiologie du VNO, étant donné le rôle qu'elles tiennent sur le stade larvaire. Ceci dit, elles ont des effets retardés et donc d'autant plus difficiles à cerner. Les précipitations peuvent avoir un effet à double tranchant, et peuvent être qualifiées de « variables de distorsion ».

### Liens entre températures et précipitations

- Températures et précipitations pourraient avoir ensemble un effet tandem (combiné) (ex. : températures élevées + précipitations faibles = répercussions supérieures qu'avec un seul paramètre isolé).
- Une température élevée et de faibles précipitations seraient de bons indicateurs de croissance et d'abondance de *Culex spp.* (la température étant meilleur prédicteur que les précipitations).

- Les conditions annuelles optimales en termes d'abondance vectorielle seraient : des conditions hivernales douces, un printemps et un été secs, des vagues de chaleurs tôt en saison estivale avec des températures minimales élevées, et un automne plutôt chaud et humide.
- Les conditions journalières optimales en termes d'abondance vectorielle seraient : des températures élevées (au-dessus des normales saisonnières), avec un faible facteur éolien et de faibles précipitations (précipitations élevées dans les semaines précédentes).

### **Abondance**

- L'abondance relative de *Cx spp.* est probablement le paramètre le plus facilement estimable à partir des paramètres météorologiques, bien qu'il soit également possible d'estimer le taux d'infection. Il n'y a cependant pas de proportionnalité entre densité/abondance et transmission à l'humain.
- Les effets de la température sur l'abondance de *Cx spp.* étaient observables directement avant la capture, alors que ceux des précipitations étaient plus retardés (et moins directement reliés).
- Il est possible de prédire assez fidèlement l'abondance de *Cx spp.* à certains moments précis dans la saison en utilisant des données météorologiques rétrospectives (meilleures prédictions pour les valeurs élevées de moustiques, en fin de saison).

### **Autres**

- Il existerait une relation entre de faibles précipitations en cours de saison, des températures élevées, et une augmentation du nombre de cas humains de VNO.
- L'augmentation de la température ambiante est l'un des prédicteurs temporels les plus forts de l'augmentation des taux d'infection des vecteurs (*Cx pipiens-restuans*); les différences cumulatives en températures seraient d'ailleurs un facteur clé parmi les années ayant connu de plus forts taux d'infection (vecteurs et humains).
- Il est souvent plus pertinent d'utiliser des données rétrospectives que des données quotidiennes seules pour prévoir les tendances saisonnières à venir (conditions météorologiques des années, mois et semaines passées).
- Dans des conditions optimales, il faudrait travailler avec des données microclimatiques (à petite échelle), étant donné le nombre élevé de variables impliquées et les fortes fluctuations qu'elles peuvent entraîner. Ceci n'est souvent malheureusement pas possible (limites techniques, financières, etc.).

## 7 Forces et limites

Il convient de brièvement mentionner que, même si la méthodologie empruntée nous a bel et bien servi pour répondre à la prémisse initiale, plusieurs limites doivent être considérées pour nuancer les conclusions présentées.

L'absence de données proprement québécoises en la matière est la plus grande lacune de cet ouvrage, les données publiées n'étant pas validées dans ces conditions (réalités et distinctions régionales, vecteurs endémiques, etc.).

Sans aucune prétention d'exhaustivité, ce travail n'a abordé qu'un nombre limité d'articles et de documents de recherche. La réflexion présentée est donc basée sur un échantillon partiel de toute la littérature disponible (lequel a tout de même été sélectionné par priorisation, se concentrant d'abord sur le plus pertinent par rapport aux questions posées et le plus actuel).

Dans la même optique, seul un nombre limité de paramètres, de vecteurs et d'agents pathologiques ont été pris en considération lors de l'analyse. Les conclusions tirées, bien que très spécifiques, se limitent donc à une frange de la réalité actuelle (relations VNO/températures/précipitations/*Culex pipiens-restuans*).

Finalement, il semble y avoir très peu de variations méthodologiques dans les approches utilisées, parmi les documents sondés, quels que soient les pays où se sont menées les études.



## 8 Perspectives et conclusion

Depuis son introduction en 1999, nous continuons de voir apparaître année après année des éclosions régionales de VNO qui sont difficilement prévisibles. Étant donnée la non-linéarité de la dynamique de transmission de cette zoonose, il est facile de comprendre qu'il n'est pas trivial d'arriver à émettre avec précision des prédictions significatives au sujet de ces éclosions.

### Température et précipitations

La température et les précipitations ont définitivement des effets tangibles sur *Culex pipiens/restuans* et sur la transmission du VNO. Ces effets sont bien documentés dans la littérature scientifique, mais dépendent d'une multitude d'interactions avec d'autres paramètres dynamiques qui ne peuvent être ignorés. Il existe également des nuances spatiales et temporelles non négligeables à prendre en considération lors de leur évaluation. Ceci rend difficile de tirer des conclusions sur l'ampleur des impacts qu'ils peuvent réellement avoir individuellement, et sur la pertinence de leur utilisation en tant qu'indicateurs prédictifs du risque d'infection humain au VNO dans une optique de vigilance.

L'utilisation individuelle de ces deux paramètres météorologiques serait à tout le moins simpliste. Il est toutefois possible d'obtenir des prédictions significatives en les utilisant comme indicateurs lorsqu'elles sont incorporées dans des modèles validés et en tenant compte de la complexité des interactions en jeu. Ce genre de démarche requiert nécessairement une expertise et un investissement substantiel (besoin de données longitudinales exhaustives, développement de modèles mathématiques parcimonieux devant constamment être ajustés, etc.).

### Degrés-jours

Même si moins exhaustive, l'utilisation de degrés-jours cumulatifs peut représenter une approche intéressante et plus simple à implémenter. Les degrés-jours cumulatifs peuvent être calculés durant la saison estivale, permettant de créer des cartes graduées. Puisque le risque de transmission augmente avec l'accumulation de degré-jour, il peut être envisageable d'utiliser cette information pour déterminer la fenêtre spatio-temporelle où il existe un risque potentiel de transmission (dans l'éventualité où le vecteur, le virus et les autres conditions nécessaires étaient réunis). Dans le cas particulier du VNO et des *Culex* spp., ces informations peuvent être jumelées à d'autres alertes de prévision lorsque le seuil de 109 DJ au-dessus de 14.3 °C est atteint au courant de l'été, notamment pour guider les efforts d'interventions locales, ou encore pour émettre des alertes préventives à la population.

Alternativement, il pourrait être intéressant d'incorporer ces indicateurs dans les programmes de surveillance intégrée du VNO au Québec, en faisant par exemple la construction d'un modèle utilisant les données de surveillance entomologique (taux d'infection des vecteurs) et des données de cas de VNO humains rapportés (registre de maladie à déclaration obligatoire) pour émettre des prévisions. Ceci dit, cette avenue s'avère peut-être encore prématurée, étant donné le manque d'études locales (absence de validation : manque d'information sur les vecteurs endémiques locaux, à petite échelle, sur différents secteurs et différentes années). D'ailleurs, à l'heure actuelle, le suivi météorologique effectué au Québec est fait à titre exploratoire seulement, puisque la méthodologie n'a pas été encore validée pour le territoire québécois. Les conclusions obtenues dans les études étrangères peuvent donc difficilement être extrapolées pour parler de la réalité québécoise.

## Perspectives

Les conclusions ressortant de cette revue de littérature pourront alimenter d'autres réflexions sur le VNO. Il serait également intéressant de développer de meilleures méthodologies ou de meilleurs modèles (plus de données, sur une plus longue période de temps, incluant plus de paramètres, surtout rétrospectivement et longitudinalement) permettant par exemple de pouvoir éventuellement émettre des alertes sur les périodes et les zones à risque en fonction de la météorologie.

Les notions présentées dans ce document sont particulièrement pertinentes dans un contexte de changements climatiques. En effet, l'évolution des conditions météorologiques à l'échelle mondiale implique des changements dans les habitudes de vie, dans le développement de milieux urbains, ainsi que dans l'écosystème des vecteurs. Ceci rend particulièrement important le développement de notre capacité à prévoir comment les facteurs météorologiques locaux et les facteurs environnementaux interdépendants affecteront les risques de transmission du VNO.

Si les changements climatiques introduisent progressivement des étés plus chauds et des hivers plus courts, ceux-ci joueraient probablement en faveur du cycle de vie des *Culex*, puisqu'une abondance particulièrement élevée de moustiques et des taux d'infection supérieurs des vecteurs sont généralement observés lorsque les conditions climatiques excèdent les valeurs seuils. En fait, tout porte à croire que les variations anticipées (températures ambiantes plus chaudes, fluctuations en termes de quantité de précipitations reçues) augmenteront non seulement la distribution et l'émergence d'une grande variété de maladies infectieuses (dont fait partie le VNO) (Johnson, 2013), mais entraîneront également des populations de vecteurs beaucoup plus denses et une amplification virale accélérée du VNO. Les changements climatiques contribueraient aussi au maintien du VNO (processus d'endémisation) à plusieurs endroits sur la planète, particulièrement dans le sud-est de l'Europe, l'Asie occidentale, les prairies canadiennes, et certaines parties des États-Unis et de l'Australie (Paz, 2015). L'*Intergovernmental Panel on Climate Change* identifie d'ailleurs les zoonoses parmi les conséquences les plus appelées à changer à cause des changements climatiques (IPCC, 2007).

## 9 Références bibliographiques

- Andreadis S. S., Dimotsiou O. C., & Savopoulou-Soultani, M. (2014). Variation in adult longevity of *Culex pipiens f. pipiens*, vector of the West Nile Virus. *Parasitology Research*, 113(11), 4315–4319. <https://doi.org/10.1007/s00436-014-4152-x>
- Bellini R., Zeller H., Van Bortel W., (2014). A review of the vector management methods to prevent and control outbreaks of West Nile virus infection and the challenge for Europe. *Parasites & Vectors* 2014; 7: 323.
- Belloncik S., *et al.*, (1982). Activity of California encephalitis group viruses in Entrelacs (province of Quebec, Canada). *Canadian Journal of Microbiology* 1982; 28: 572-579.
- Bolling B. G., Barker C. M., Moore C. G., Pape W. J., & Eisen L., (2009). Seasonal patterns for entomological measures of risk for exposure to *Culex* vectors and West Nile virus in relation to human disease cases in northeastern Colorado. *Journal of Medical Entomology*, 46(6), 1519–1531.
- Bowden SE, Magori K, Drake JM., (2011). Regional differences in the association between land cover and West Nile virus disease incidence in humans in the United States. *Am J Trop Med Hyg.* 2011 Feb;84(2):234-8. doi: 10.4269/ajtmh.2011.10-0134
- Bustamante DM, Lord CC (2010). Sources of error in the estimation of mosquito infection rates used to assess risk of arbovirus transmission. *Am J Trop Med Hyg.* 2010. 82(6): p. 1172-84.
- Center for Disease Control and Prevention (CDC) (2016). West Nile Virus - Statistics & Maps, consultée en ligne le 1<sup>er</sup> juin 2017, accessible au : <https://www.cdc.gov/westnile/statsmaps/index.html>
- Chen S., Blanford J. I., Fleischer S. J., Hutchinson M., Saunders M. C., & Thomas M. B., (2012). Estimating West Nile Virus Transmission Period in Pennsylvania Using an Optimized Degree-Day Model. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 13(7), 489–497. <https://doi.org/10.1089/vbz.2012.1094>
- Chevalier V., A. Tran, et B. Durand (2014). Predictive modeling of West Nile virus transmission risk in the Mediterranean Basin: how far from landing? *Int J Environ Res Public Health*, 2014. 11(1): p. 67-90.
- Chuang T.-W., Hildreth M. B., Vanroekel D. L., & Wimberly M. C., (2011). Weather and land cover influences on mosquito populations in Sioux Falls, South Dakota. *Journal of Medical Entomology*, 48(3), 669–679.
- Chung WM, *et al.*, (2013). The 2012 West Nile encephalitis epidemic in Dallas, Texas. *JAMA* 310: 297–307. 27.
- Crans, WJ (2004). A classification system for mosquito life cycles: life cycle types for mosquitoes of the northeastern United States. *J Vector Ecol.* 2004 Jun; 29(1):1-10.
- DeGroot JP, Sugumaran R., Ecker M., (2012) Landscape, demographic and climatic associations with human West Nile virus occurrence regionally in 2012 in the United States of America. *Geospat Health.* 2014 Nov; 9(1):153-68.
- DeGroot JP, Sugumaran R., Ecker M., (2014). Landscape, demographic and climatic associations with human West Nile virus occurrence regionally in 2012 in the United States of America. *Geospatial Health*, 9(1), 153–168.

Deichmeister J.M., & Telang A., (2011). Abundance of West Nile virus mosquito vectors in relation to climate and landscape variables. *Journal of Vector Ecology*, 36(1), 75–85.

Fontenille D., Lagneau C., Lecollinet S., Lefait Robin R., Setbon M., Tirel B., *et al.*, (2009). La lutte antivectorielle en France. Nouvelle édition [en ligne]. Marseille : IRD Éditions, 2009 (généré le 17 juin 2018). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/1214>>. ISBN : 9782709917773. DOI : 10.4000/books.irdeditions.1214.

Gardner A. M., Hamer G. L., Hines A. M., Newman C. M., Walker E. D., & Ruiz M. O., (2012). Weather variability affects abundance of larval *Culex* (Diptera: Culicidae) in storm water catch basins in suburban Chicago. *Journal of Medical Entomology*, 49(2), 270–276.

Gibbs, S.E., *et al.*, (2006). Factors affecting the geographic distribution of West Nile Virus in Georgia, USA: 2002-2004. *Vector Borne Zoonotic Dis.* 6: 73-82.

Goff G, Whitney H, Drebot MA. (2012). Roles of host species, geographic separation, and isolation in the seroprevalence of Jamestown Canyon and snowshoe hare viruses in Newfoundland. *Applied and Environmental Microbiology* 2012; 78: 6734-6740.

Hadler JL, *et al.*, (2014). National capacity for surveillance, prevention, and control of West Nile virus and other arbovirus infections--United States, 2004 and 2012. *Morbidity and Mortality Weekly Report* 2014; 63: 281-284.

Hahn M. B., Monaghan A. J., Hayden M. H., Eisen R. J., Delorey M. J., Lindsey N. P., Fischer M., (2015). Meteorological Conditions Associated with Increased Incidence of West Nile Virus Disease in the United States, 2004-2012. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 92(5), 1013–1022. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.14-0737>

Harbach R. E., (2012). *Culex pipiens*: Species Versus Species Complex – Taxonomic History and Perspective. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 28(4s), 10–23. <https://doi.org/10.2987/8756-971X-28.4.10>

Helbing C. M., Moorhead D. L., & Mitchell L., (2015). Population Dynamics of *Culex restuans* and *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) Related to Climatic Factors in Northwest Ohio. *Environmental Entomology*, 44(4), 1022–1028. <https://doi.org/10.1093/ee/nvv094>

Hubálek Z., Kriz B., Menne B., (2006). West Nile virus: ecology, epidemiology and prevention. In: Menne B., Ebi KL, editors. *Climate change and adaptation: strategies for human health*. Darmstadt: WHO, Steinkopff Verlag; p. 217-42.

Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) (2016). Surveillance de l'infection par le virus du Nil occidental au Québec : Rapport annuel (année 2015). Auteurs : Normandin L., *et al.*, août 2016, 18 pp.

Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), (2014). Le risque relié au virus du Nil occidental au Québec et les interventions à privilégier en 2013 : addenda pour soutenir la gestion du risque en 2014 : avis scientifique. Auteurs : Lowe AM, *et al.*, 2014, Montréal: Institut national de santé publique du Québec. vii, 68 p.

Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), (2012). Rapport d'activités 2011-2012 du Laboratoire de santé publique du Québec. INSPQ, 2012.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007). Climate change: Working Group II: Impacts, adaptation and vulnerability. Executive summary. Chapter 8: Human health. Document consulté le 8 mars 2017, disponible au [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg2/en/contents.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html)
- Johnson, B. J., & Sukhdeo M. V. K., (2013). Drought-Induced Amplification of Local and Regional West Nile Virus Infection Rates in New Jersey. *Journal of Medical Entomology*, 50(1), 195–204. <https://doi.org/10.1603/ME12035>
- Jones C. E., Lounibos L. P., Marra P. P., & Kilpatrick A. M., (2012). Rainfall influences survival of *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) in a residential neighborhood in the mid-Atlantic United States. *Journal of Medical Entomology*, 49(3), 467–473.
- Karki S., Anderson T., Goldberg T., Krebs B., Hamer G., Kitron U., O'Hara Ruiz M., (2016). Effect of Trapping Methods, Weather, and Landscape on Estimates of the *Culex* Vector Mosquito Abundance. *Environmental Health Insights*, 93. <https://doi.org/10.4137/EHI.S33384>
- Kilpatrick AM1, Pape WJ., (2013) Predicting human West Nile virus infections with mosquito surveillance data. *Am J Epidemiol*. 2013 Sep 1;178(5):829-35. doi: 10.1093/aje/kwt046. Epub 2013 Jul 3.
- Kilpatrick A. M., Fonseca D. M., Ebel G. D., Reddy M. R., & Kramer L. D., (2010). Spatial and Temporal Variation in Vector Competence of *Culex pipiens* and *Cx. restuans* Mosquitoes for West Nile Virus. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 83(3), 607–613. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.2010.10-0005>
- Kramer LD, Styer LM, Ebel GD., (2008). A global perspective on the epidemiology of West Nile virus. *Annual Review of Entomology* 2008; 53: 61-81.
- Kulkarni MA, *et al.*, (2015). Major emerging vector-borne zoonotic diseases of public health importance in Canada. *Emerging microbes & infections* 2015; 4: e33.
- Landesman WJ1, Allan BF, Langerhans RB, Knight TM, Chase JM., (2007) Inter-annual associations between precipitation and human incidence of West Nile virus in the United States. *Vector Borne Zoonotic Dis*. 2007 Fall;7(3):337-43.
- Last, John M., (2004). Dictionnaire d'épidémiologie. Ed. Maloine., 306 pp.
- Little E., Campbell S. R., & Shaman J., (2016). Development and validation of a climate-based ensemble prediction model for West Nile Virus infection rates in *Culex* mosquitoes, Suffolk County, New York. *Parasites & Vectors*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1720-1>
- Liu H., Weng QH, Gaines D., (2008). Spatio-temporal analysis of the relationship between WNV dissemination and environmental variables in Indianapolis, USA. *International Journal of Health Geographics* 2008, 7:66.
- Lockaby G., Noori N., Morse W., Zipperer W., Kalin L., Governo R., Ricker M., (2016). Climatic, ecological, and socioeconomic factors associated with West Nile virus incidence in Atlanta, Georgia, USA. *Journal of Vector Ecology*, 41(2), 232–243.
- Marini G., Poletti P., Giacobini M., Pugliese A., Merler S., & Rosà R., (2016). The Role of Climatic and Density Dependent Factors in Shaping Mosquito Population Dynamics: The Case of *Culex pipiens* in Northwestern Italy. *PLOS ONE*, 11(4), e0154018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154018>

Miramontes, R., *et al.*, (2006). Is agricultural activity linked to the incidence of human West Nile virus? *Am. J. Prev. Med.* 30: 160-163.

Meyer C., ed. sc. (2017). Dictionnaire des Sciences Animales. Montpellier, France, Cirad. Consultée en ligne le 2 juin 2017, au dico-sciences-animales.cirad.fr

Ogden NH., (2016). Maladies à transmission vectorielle, changement climatique et conception urbaine. Relevé des maladies transmissibles au Canada (RMTC), Agence de la santé publique du Canada (ASPC), 2016; 42:225-6.

Ogden NH., (2016). « Maladies à transmission vectorielle, changement climatique et conception urbaine ». Relevé des maladies transmissibles au Canada 2016;42:225-6.

Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), (2015). Synthèse des évidences scientifiques sur les facteurs de risques et les indicateurs pertinents à l'évaluation du risque de transmission du virus du Nil occidental au Québec. Auteurs: Oumouna Karim *et al.*, 2015. Rapport de Stage, INSPQ.

Ozdenrol E., Taff G., & Akkus C., (2013). Exploring the Spatio-Temporal Dynamics of Reservoir Hosts, Vectors, and Human Hosts of West Nile Virus: A Review of the Recent Literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(11), 5399–5432.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph10115399>

Paz S., (2015). Climate change impacts on West Nile virus transmission in a global context. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1665), 20130561–20130561. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0561>

Pecoraro HL, *et al.*, (2007). Climatic and landscape correlates for potential West Nile virus mosquito vectors in the Seattle region. *J Vector Ecol.* 2007 Jun; 32(1): 22–28.

Petersen LR, Brault AC, Nasci RS., (2013). West Nile virus: review of the literature. *Journal of the American Medical Association* 2013; 310: 308-315.

Reisen W. K., Fang Y., & Martínez V. M., (2006). Effects of Temperature on the Transmission of West Nile Virus by *Culex tarsalis*; (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 43(2), 309–317.  
[https://doi.org/10.1603/0022-2585\(2006\)043\(0309:EOTOTT\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0022-2585(2006)043(0309:EOTOTT)2.0.CO;2)

Rocheleau JP., *et al.*, (2013). Eastern Equine Encephalitis Virus: High Seroprevalence in Horses from Southern Quebec, Canada, 2012. *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 2013.

Rocheleau JP., (2016). Les caractéristiques environnementales du risque d'exposition aux arbovirus au Québec. Thèse doctorale, Département de pathologie et microbiologie, Faculté de médecine vétérinaire de l'Université de Montréal, 284 p.

Rodhain F., (2007). « Impacts potentiels du changement climatique sur la santé : l'exemple des maladies à vecteurs », *Changements climatiques et risques sanitaires en France*, Observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC), Paris, pp. 65-71.

Rodhain F., (2008). « Aspects épidémiologiques de la transmission vectorielle », texte de la conférence présentée lors des Journées AEEMA, 22-23 mai 2008. *Epidémiol. et santé anim.*, 2008, 54, 13-18. Document consulté en ligne, le 30 mai 2017, au :  
<http://aeema.vet-alfort.fr/images/2008-54/54.04.pdf>

Rosà R., Marini G., Bolzoni L., Neteler M., Metz M., Delucchi L., *et al.*, (2014). Early warning of West Nile virus mosquito vector: climate and land use models successfully explain phenology and abundance of *Culex pipiens* mosquitoes in north-western Italy. *Parasites & Vectors*, 7(1), 269.

Ruiz M. O., *et al.*, (2010). Local impact of temperature and precipitation on West Nile virus infection in *Culex* species mosquitoes in northeast Illinois, USA. *Parasites & Vectors*, 3(1), 19.

Shaman J., Harding K., & Campbell S. R., (2011). Meteorological and Hydrological Influences on the Spatial and Temporal Prevalence of West Nile Virus in *Culex* Mosquitoes, Suffolk County, New York. *Journal of Medical Entomology*, 48(4), 867–875. <https://doi.org/10.1603/ME10269>

Soverow JE *et al.*, (2009). Infectious disease in a warming world: how weather influenced West Nile virus in the United States (2001-2005). *Environmental health perspectives* 2009 Jul;117(7):1049-52. Epub 2009 Mar 16, <https://doi.org/10.1289/ehp.0800487>

Stilianakis N. I., Syrris V., Petroski T., Pärt P., Gewehr S., Kalaitzopoulou S., Hadjichristodoulou C., (2016). Identification of Climatic Factors Affecting the Epidemiology of Human West Nile Virus Infections in Northern Greece. *PLOS ONE*, 11(9), e0161510. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161510>

Takeda T, *et al.*, (2003). Arbovirus surveillance in Rhode Island: assessing potential ecologic and climatic correlates. *J Am Mosq Control Assoc.* 2003 Sep; 19(3): 179–189.

Trawinski P. R., & MacKay D. S., (2008). Meteorologically Conditioned Time-Series Predictions of West Nile Virus Vector Mosquitoes. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 8(4), 505–522. <https://doi.org/10.1089/vbz.2007.0202>

Schellenberg, *et al.*, (2006). « Seroprevalence of West Nile Virus in Saskatchewan's Five Hills Health Region », *Canadian Journal of Public Health*, Sept-Oct 2006, pp. 369-373.

Walsh AS, *et al.*, (2008). Predicting seasonal abundance of mosquitoes based on off-season meteorological conditions. *Environmental and Ecological Statistics* 2008, 15:279-291.

Wang J., Ogden N. H., & Zhu H. (2011). The impact of weather conditions on *Culex pipiens* and *Culex restuans* (Diptera: Culicidae) abundance: a case study in Peel Region. *Journal of Medical Entomology*, 48(2), 468–75.

Winters AM, *et al.*, (2009). Predictive spatial models for risk of West Nile virus exposure in eastern and western Colorado. *Am J Trop Med Hyg* 79: 581–590.

Yoo E.-H., Chen D., Diao C., & Russell C., (2016). The Effects of Weather and Environmental Factors on West Nile Virus Mosquito Abundance in Greater Toronto Area. *Earth Interactions*, 20(3), 1–22. <https://doi.org/10.1175/EI-D-15-0003.1>





[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)