



**Évaluation de la performance
des avertissements de chaleur extrême émis
par le système SUPREME au Québec
de 2010 à 2016**

CHANGEMENTS CLIMATIQUES

AUTEURS

Ray Bustinza, M. Sc., conseiller scientifique

Germain Lebel, M. A., M. Sc., conseiller scientifique

Marjolaine Dubé, B. Sc., statisticienne

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

RÉVISEUR

Pierre Gosselin, M.D., MPH

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

RÉVISION ET MISE EN PAGE

Véronique Paquet, agente administrative

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier Barbara Casati, du Service météorologique du Canada, et Fateh Chebana, de l'Institut national de la recherche scientifique, pour leurs conseils d'experts au niveau statistique.

Cette étude a été réalisée grâce au soutien financier du Fonds vert, dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

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.

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

Dépôt légal – 3^e trimestre 2017

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN : 978-2-550-79217-8 (PDF)

© Gouvernement du Québec (2017)

Table des matières

Liste des tableaux	II
Liste des sigles et acronymes	III
Faits saillants	1
Sommaire	1
1 Contexte	3
2 Objectif	3
3 Méthodologie	4
3.1 Le territoire et la période étudiés	4
3.2 Les paramètres des avertissements de chaleur extrême	4
3.3 L'émission des avertissements de chaleur extrême	4
3.4 Le repérage des vagues de chaleur	5
3.5 Les données utilisées	5
3.6 Les analyses statistiques	5
4 Résultats	7
4.1 Le nombre d'avertissements de chaleur extrême et de vagues de chaleur	7
4.2 La performance des avertissements de chaleur extrême	8
4.3 L'intensité des vagues de chaleur	9
5 Discussion	10
5.1 La pertinence de l'IDES et les limites des mesures d'évaluation traditionnelles	10
5.2 Nombre élevé de vagues de chaleur manquées	11
5.3 Disparité des résultats selon les classes météorologiques	12
5.4 L'intensité des vagues de chaleur	13
5.5 Forces et limites de l'étude	14
6 Conclusion	14
Références	15
Annexe 1 Régions de prévisions météorologiques couvertes par le système SUPREME et leur station météorologique de référence	17
Annexe 2 Valeurs-seuils de chaleur extrême, nombre de jours à examiner et coefficients de pondération selon les régions sociosanitaires	19
Annexe 3 Nombre de vagues de chaleur et d'avertissements de chaleur extrême et leur performance, par classe météorologique et région sociosanitaire, Québec, 2010-2016	20
Annexe 4 Portrait des vagues de chaleur par classe météorologique et région de prévisions météorologiques, Québec, 2010-2016	21

Liste des tableaux

Tableau 1	Valeurs-seuils et autres paramètres des ACE selon la classe météorologique.....	4
Tableau 2	Tableau de contingence : association entre un ACE et une vague de chaleur	5
Tableau 3	Nombre d'avertissements de chaleur extrême selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016	7
Tableau 4	Nombre de vagues de chaleur selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016	8
Tableau 5	Tableaux de contingence des avertissements de chaleur extrême selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016	8
Tableau 6	Sensibilité et spécificité des avertissements de chaleur extrême selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016.....	8
Tableau 7	Indice de dépendance extrême symétrique et moyenne saisonnière du nombre de faux avertissements selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016.....	9
Tableau 8	Intensité moyenne des vagues de chaleur, Québec, 2010-2016	9

Liste des sigles et acronymes

ACE	Avertissements de chaleur extrême
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
IDES	Indice de dépendance extrême symétrique
INRS	Institut national de la recherche scientifique
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
NA	Non applicable
RPM	Région de prévisions météorologiques
RSS	Région sociosanitaire
S	Sensibilité
S _{IDES}	Erreur type de l'IDES
Sp	Spécificité
SUPREME	Surveillance et prévention des impacts sanitaires des évènements météorologiques extrêmes
Temp. max.	Température maximale
Temp. min.	Température minimale

Faits saillants

Cette étude a pour but d'évaluer la performance des avertissements de chaleur extrême émis par le système de Surveillance et de prévention des impacts sanitaires des événements météorologiques extrêmes (SUPREME) de l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). Afin de déterminer si le système prédit les vagues de chaleur en temps opportun, l'indice de dépendance extrême symétrique, la sensibilité et la spécificité ont été calculés pendant les saisons estivales de 2010 à 2016.

- Du point de vue météorologique, les vagues de chaleur au Québec sont des événements particulièrement rares. De 2010 à 2016, dans l'ensemble des 52 régions météorologiques étudiées, seulement 98 vagues de chaleur ont été observées. Ainsi, il survient en moyenne une vague de chaleur par quatre ans, par région de prévisions météorologiques.
- D'après l'indice de dépendance extrême symétrique, la performance globale des avertissements de chaleur extrême du système SUPREME est bonne. Toutefois, le nombre de vagues de chaleur manquées (qui n'ont pas été prévues par les avertissements de chaleur extrême) est relativement élevé.
- L'évaluation de la performance des avertissements de chaleur extrême est fortement influencée par les incertitudes inhérentes aux prévisions météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada ce qui expliquerait un nombre aussi important de vagues de chaleur manquées.
- Il serait possible de réduire le nombre de vagues de chaleur qui n'a pas été prévu en abaissant quelque peu les valeurs-seuils de température utilisées pour l'émission des avertissements de chaleur extrême ou en arrondissant à l'unité, au lieu d'une décimale, les moyennes des températures prévues calculées pour émettre les avertissements de chaleur extrême.
- Tel qu'attendu, les mesures d'évaluation traditionnelles, telles que la sensibilité et la spécificité, ne se sont pas révélées indiquées pour les avertissements de chaleur extrême.

Sommaire

Contexte

Au Québec, depuis 2010, le système de Surveillance et de prévention des impacts sanitaires des événements météorologiques extrêmes (SUPREME) de l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) émet des avertissements de chaleur extrême (ACE) à l'intention des intervenants de santé publique. Ces ACE sont censés prédire des vagues de chaleur, cependant, leur performance n'a pas encore été évaluée.

Évaluer la performance d'un système de prévisions d'événements météorologiques rares, comme les vagues de chaleur, pose toutefois des problèmes méthodologiques importants. En effet, en raison de défauts méthodologiques propres aux mesures d'évaluation, la majorité des mesures traditionnelles donnent des résultats qui tendent rapidement vers des valeurs dépourvues de signification lorsque la rareté de l'événement augmente. En revanche, l'indice de dépendance extrême symétrique (IDES) est une mesure d'évaluation plus appropriée pour évaluer la performance des ACE dans la mesure où il est indépendant de la rareté de l'événement (Ferro et Stephenson, 2011).

Objectifs de la recherche

Cette recherche vise à analyser la performance des ACE du système SUPREME en étudiant le lien entre les dates d'émission des ACE et les dates de début des vagues de chaleur. Plus spécifiquement, l'étude vise à estimer l'IDES ainsi que la sensibilité et la spécificité des ACE émis par le système SUPREME.

L'hypothèse à vérifier stipule que les ACE du système SUPREME prédisent en temps opportun les vagues de chaleur.

Méthodologie

Le territoire à l'étude comprend les 52 régions de prévisions météorologiques couvertes par les ACE du système SUPREME. La période à l'étude couvre les saisons estivales des années 2010 à 2016.

Les dates d'émission des ACE pendant la période à l'étude ont été extraites des archives du système SUPREME. L'émission des ACE est basée sur l'atteinte de certaines valeurs-seuils des températures prévues par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC).

Les températures observées utilisées pour repérer les vagues de chaleur, leur date de début et leur durée proviennent des archives d'ECCC. Le repérage des vagues de chaleur est basé sur l'atteinte des mêmes valeurs-seuils des ACE.

La sensibilité, la spécificité et l'IDES ont été calculés en comparant les dates d'émission des ACE aux dates de début des vagues de chaleur et à l'aide d'un tableau de contingence.

L'intensité de chacune des vagues de chaleur a été estimée en utilisant le calcul des degrés-jours cumulés. Les degrés-jours cumulés déterminent l'intensité d'une vague de chaleur en tenant compte du cumul des écarts entre les températures maximales et minimales et les valeurs-seuils de chaleur extrême pendant la durée de la vague de chaleur.

Principaux constats de la recherche

- Des 98 vagues de chaleur observées pendant les saisons estivales de 2010 à 2016, 47 ont été prévues par les ACE du système SUPREME, et 51 ont été manquées. Dans la même période, des 90 ACE émis par le système SUPREME, 43 ont été faux.
- La moyenne saisonnière globale du nombre de faux ACE est de 0,12 par région de prévisions météorologiques.
- L'IDES de l'ensemble des ACE est de 0,83, tandis que la sensibilité est de 0,48 et la spécificité est de 1,00.
- L'IDES des ACE dont l'émission est basée sur la considération de « 2 jours » de prévisions est de 0,88 tandis que celui des ACE dont l'émission est basée sur la considération de « 3 jours » est de 0,67. Le système SUPREME comporte deux méthodes d'émission d'ACE qui diffèrent selon le nombre de jours de prévisions devant être considéré. Ainsi, la différence quant à l'IDES selon les classes ne

semble pas attribuable à la qualité des prévisions, mais plutôt au nombre de jours de prévision utilisé.

- L'intensité moyenne des vagues de chaleur observées, mesurée comme le cumul des écarts entre les températures observées (maximum et minimum) et les valeurs-seuils de chaleur extrême est de 4,4 degrés-jours. Contrairement à ce qui était attendu, l'intensité moyenne des vagues de chaleur manquées est plus élevée (4,8 degrés-jours) que celle des vagues de chaleur prévues (4,0 degrés-jours).

Pistes pour l'action

Réduire le nombre de vagues de chaleur manquées

Étant donné que les coûts des vagues de chaleur manquées sur le système de santé peuvent être très élevés, les auteurs proposent d'en réduire le nombre en abaissant les valeurs-seuils de température auxquelles les avertissements sont émis ou en arrondissant à l'unité, au lieu d'une décimale, les moyennes des températures prévues calculées pour émettre les ACE, tout en s'assurant de ne pas trop augmenter le nombre de faux ACE.

Conclusions

La performance des ACE

- À la lumière des résultats obtenus, selon le calcul de l'IDES (0,83), la performance globale des ACE est bonne.
- Les mesures traditionnelles, telles que la sensibilité ou la spécificité, ne semblent pas adéquates pour évaluer les prévisions des événements rares comme les vagues de chaleur.

Les vagues de chaleur manquées

- Le nombre de vagues de chaleur manquées est relativement élevé. Des 98 vagues de chaleur observées, 51 n'ont pas été prévues par les ACE.
- Des recommandations sont émises afin de diminuer le nombre de vagues de chaleur manquées.

L'intensité des vagues de chaleur et la performance des ACE

- L'évaluation du lien entre l'intensité des vagues de chaleur et la performance des ACE ne mène pas à des résultats concluants.

1 Contexte

Au Québec, depuis 2010, le volet « chaleur » du système de Surveillance et de prévention des impacts sanitaires des événements météorologiques extrêmes (SUPREME) (Toutant et collab., 2011), développé par l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), émet des avertissements de chaleur extrême (ACE). Ces avertissements sont censés prédire les vagues de chaleur, c'est-à-dire les périodes pendant lesquelles les températures atteignent les valeurs-seuils de chaleur extrême (tableau 1).

Les ACE sont basés sur les températures prévues par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Ils sont émis à l'intention des intervenants de santé publique et des équipes de coordination de la sécurité civile des régions sociosanitaires (RSS) afin de les aider à prendre la décision de déclencher la mise en place, en temps opportun, des mesures de prévention et de protection de la santé de la population. Ainsi, les ACE du système SUPREME sont un outil d'aide à la décision dont la performance n'a cependant pas encore été évaluée.

L'évaluation de la performance des prévisions des événements météorologiques rares, comme les vagues de chaleur, pose toutefois des problèmes méthodologiques spécifiques. En effet, les mesures d'évaluation traditionnelles, telles que la sensibilité ou la spécificité, produisent des résultats qui tendent rapidement vers des valeurs dépourvues de signification (p. ex. : 0 pour la sensibilité, 1 pour la spécificité) à mesure que la rareté de l'évènement observé augmente (Stephenson et collab., 2008). Cette situation procure une appréciation inadéquate des performances des systèmes de prévision des événements météorologiques rares (Stephenson et collab., 2008).

Depuis quelques années, il y a un intérêt scientifique croissant pour les mesures de vérification des prévisions des événements rares (Doswell, Davies-Jones et Keller, 1990; Stephenson et collab., 2008). En 2011, à cette fin, Ferro et Stephenson ont proposé l'indice de dépendance extrême symétrique (IDES) (Ferro et Stephenson, 2011). L'IDES est une mesure qui évalue adéquatement la performance d'un système émettant des prévisions d'évènements rares, du moment où il ne conduit pas à des valeurs dépourvues de signification, tout en corrigeant certaines faiblesses des mesures proposées par d'autres auteurs (Ferro et Stephenson, 2011).

2 Objectif

L'objectif de l'étude est d'analyser la performance des ACE du système SUPREME en étudiant le lien chronologique entre les dates d'émission des ACE (basées sur les températures prévues) et les dates de début des vagues de chaleur (basées sur les températures observées). Plus spécifiquement, l'étude vise à estimer l'IDES des ACE émis par le système SUPREME. Aux fins de comparaison avec l'IDES, la sensibilité et la spécificité sont aussi estimées.

L'hypothèse à vérifier stipule que les ACE du système SUPREME prédisent en temps opportun les vagues de chaleur.

3 Méthodologie

3.1 Le territoire et la période étudiés

Le territoire à l'étude comprend 52 des 68 régions de prévisions météorologiques (RPM) de la province de Québec (annexe 1) pour lesquelles des valeurs-seuils de chaleur extrême ont été établies et qui, en conséquence, sont couvertes par les ACE du système SUPREME. Les RPM correspondent aux plus petites unités géographiques, homogènes du point de vue météorologique, conçues et établies par ECCC, et pour lesquelles le Service météorologique du Canada émet diverses prévisions météorologiques, dont les températures. Les RPM non couvertes par le système SUPREME sont situées à l'extrême nord de la province, dans les RSS du Nunavik et des Terres-Cries-de-la-Baie-James.

La période à l'étude couvre les saisons estivales (du 1^{er} mai au 30 septembre) des années 2010 à 2016. En tenant compte des 153 jours de chaque saison estivale, des 52 RPM couvertes et des 7 saisons analysées, la période totale à l'étude comprend 55 692 jours-régions.

3.2 Les paramètres des avertissements de chaleur extrême

Afin de déterminer les valeurs-seuils de température associées à des impacts significatifs sur la santé, l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), en collaboration avec l'INSPQ, a analysé les données de décès quotidiens de 1981 à 2005 et les données des températures maximales et minimales observées pendant la même période (Chebana et collab., 2013; Martel et collab., 2010). Cette étude a permis d'identifier par classe météorologique (regroupement de RSS semblables du point de vue météorologique) les valeurs-seuils de chaleur extrême, c'est-à-dire les températures associées à une surmortalité quotidienne de 60 % ou plus, ainsi que deux autres paramètres nécessaires pour calculer les moyennes des températures, soit le nombre de jours à être considérés et les coefficients de pondération à être appliqués.

En se basant sur les résultats de cette étude, l'INSPQ a établi les valeurs-seuils de chaleur extrême des températures maximales et minimales pour chacune des classes météorologiques (tableau 1). Les valeurs-seuils ont ensuite été entérinées par l'ensemble des directions de santé publique (DSP) et par le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). La distribution des RSS par classe météorologique est présentée à l'annexe 2.

Tableau 1 Valeurs-seuils et autres paramètres des ACE selon la classe météorologique

Classe météorologique	Valeurs-seuils de chaleur extrême		Nombre de jours à considérer	Coefficients de pondération J ₁ -J ₂ -J ₃
	Temp. max. (°C)	Temp. min. (°C)		
Classe 1	33	20	3	0,4-0,4-0,2
Classe 2	31	18	2	0,5-0,5
Classe 3	31	16	3	0,4-0,4-0,2

Le paramètre « coefficients de pondération » a été utilisé afin de considérer les incertitudes inhérentes aux prévisions météorologiques. Ainsi, la pondération des températures moyennes prévues permet de corriger partiellement cette incertitude, en attribuant moins d'importance aux prévisions qui présentent le plus d'incertitude, soit les plus éloignées de la date de prévision (le jour 3 [J₃] des classes 1 et 3, tableau 1).

3.3 L'émission des avertissements de chaleur extrême

Pour émettre des ACE, le système SUPREME utilise les températures quotidiennes **prévues** et les paramètres « valeurs-seuils de chaleur extrême », « nombre de jours considérés » et « coefficients de pondération » présentés au tableau 1. Un ACE est généré lorsque les moyennes pondérées (arrondies à une décimale) des températures maximales et minimales prévues (pendant les jours considérés) atteignent les valeurs-seuils de chaleur extrême. Le système SUPREME analyse plusieurs fois par jour les prévisions des températures du lendemain et des jours subséquents de façon à ce que les ACE puissent être émis la veille d'une éventuelle vague de chaleur.

Le système SUPREME émet les ACE à l'échelle des RPM¹. Une fois qu'un ACE a été émis pour une RPM donnée, l'émission éventuelle d'autres ACE pour la même RPM est automatiquement interrompue pendant au minimum 3 jours. L'émission ne reprendra qu'après une journée pendant laquelle les températures prévues n'atteignent pas les valeurs-seuils. Cette interruption a été convenue avec les DSP afin d'éviter que l'émission d'avertissements se prolonge inutilement pendant toute la durée de la vague de chaleur.

3.4 Le repérage des vagues de chaleur

Pour délimiter une vague de chaleur, il est nécessaire de repérer sa date de début et de définir sa durée. Dans un premier temps, pour repérer la date de début, les températures quotidiennes **observées** aux stations météorologiques de référence des RPM (annexe 1), de même que les paramètres « valeurs-seuils de chaleur extrême » et « nombre de jours à considérer », définis dans le tableau 1, ont été utilisés. Chaque station météorologique de référence est considérée comme représentative de la situation météorologique globale de l'ensemble d'une RPM. Une vague de chaleur est repérée lorsque les moyennes des températures maximales et minimales observées pendant le nombre de jours considérés atteignent les valeurs-seuils de chaleur extrême. Comme l'identification des vagues de chaleur est basée sur les températures **observées**, l'utilisation du paramètre « coefficients de pondération » n'est pas nécessaire.

Dans un deuxième temps, pour définir la durée des vagues de chaleur, il faut estimer la date de fin en calculant les moyennes mobiles des températures maximales et minimales observées. La date de fin d'une vague de chaleur correspond à la dernière journée où les moyennes mobiles ont atteint les valeurs-seuils de chaleur extrême.

3.5 Les données utilisées

Les dates d'émission des ACE pendant la période à l'étude ont été extraites des archives du système SUPREME. Les températures quotidiennes maximales et minimales observées dans les stations météorologiques de référence (annexe 1) proviennent des archives d'ECCC.

3.6 Les analyses statistiques

3.6.1 L'ASSOCIATION ENTRE LES AVERTISSEMENTS ET LES VAGUES DE CHALEUR

L'émission des ACE se fonde sur l'atteinte des valeurs-seuils des températures quotidiennes prévues par ECCC. Ainsi, le système SUPREME, en appliquant des valeurs-seuils, transforme ces prévisions numériques en prévisions dichotomiques, c'est-à-dire qu'elles ne comportent que deux valeurs possibles : « oui, une vague de chaleur est prévue », ou « non, une vague de chaleur n'est pas prévue ».

D'un autre côté, l'identification des vagues de chaleur s'appuie sur l'application des mêmes valeurs-seuils aux températures quotidiennes observées dans les stations météorologiques de référence. La présence de vagues de chaleur est alors aussi un événement dichotomique dans la mesure où il y a seulement deux réponses possibles : « oui, une vague de chaleur est observée » ou « non, une vague de chaleur n'est pas observée ».

Pour évaluer les prévisions dichotomiques des événements tout aussi dichotomiques, l'utilisation d'un tableau de contingence (tableau 2) est la façon la plus appropriée (Wilson et Giles, 2013).

Tableau 2 Tableau de contingence : association entre un ACE et une vague de chaleur

	Vague de chaleur observée	Pas de vague de chaleur observée
ACE émis	a	b
Pas d'ACE émis	c	d

où :

a = ACE correct (vrai positif)

b = faux ACE (faux positif)

c = vague de chaleur manquée (faux négatif)

d = absence correcte d'ACE (vrai négatif)

¹ Chaque RSS s'est vu attribuer au moins une RPM (annexe 1). Le système SUPREME couvre 16 des 18 RSS, ce qui représente une couverture de plus de 99 % de la population québécoise en 2014 (8 184 563/8 214 672).

Ce tableau de contingence résume, pour la période à l'étude, la fréquence des événements décrivant l'association entre l'émission des ACE et les vagues de chaleur. Afin de comptabiliser les valeurs dans les cellules de ce tableau de contingence, il est nécessaire de bien définir les différents événements possibles :

- a. Si, pour une journée donnée, une vague de chaleur observée a été prévue par un ACE, cet événement est comptabilisé dans la cellule « a » (ACE correct). L'ACE est « correct » lorsqu'il est émis l'avant-veille, la veille ou le jour du début d'une vague de chaleur. Même si le système SUPREME a été conçu pour émettre des ACE la veille du début des vagues de chaleur, dans la présente étude, les ACE émis le jour du début d'une vague de chaleur sont aussi considérés comme corrects, car ils ont été émis en temps opportun du point de vue de la santé publique. En effet, d'une part, les ACE sont émis habituellement avant l'aube, ce qui laisse le temps suffisant aux équipes d'intervention des DSP de se préparer adéquatement. D'autre part, les températures maximales de la journée ne sont atteintes habituellement qu'entre 15 h et 17 h.
- b. Si, pour une journée donnée, une vague de chaleur a été faussement prévue par un ACE, cet événement est comptabilisé dans la cellule « b » (faux ACE). Un ACE est « faux » lorsqu'il est émis sans qu'une vague de chaleur n'ait débuté au cours de la même journée que l'émission de l'ACE, ni pendant les deux jours subséquents.
- c. Si, pour une journée donnée, une vague de chaleur observée n'a pas été prévue par un ACE, cet événement est comptabilisé dans la cellule « c » (vague de chaleur manquée). Une vague de chaleur observée est « manquée » si aucun ACE n'est émis le jour du début de la vague de chaleur, ni pendant les deux jours précédents.
- d. Finalement, si, pour une journée donnée, aucun ACE n'est émis et que le début d'une vague de chaleur n'est pas observé, cet événement est comptabilisé dans la cellule « d » (absence correcte d'ACE).

3.6.2 LES MESURES D'ÉVALUATION DE PERFORMANCE

La sensibilité

La sensibilité estime la proportion d'événements observés correctement prévus. En référence au tableau de contingence (tableau 2), la sensibilité des ACE est estimée avec la formule suivante :

Équation 1 Sensibilité (S)

$$S = \frac{a}{a + c}$$

Les valeurs possibles de la sensibilité varient de 0 à 1, où 0 indique une sensibilité nulle (aucun événement observé n'a été prévu), et 1 indique une sensibilité parfaite (tous les événements observés ont été prévus).

La spécificité

La spécificité estime la proportion d'événements non observés (absence d'évènement) correctement prévue (absence d'avertissement). La spécificité est calculée avec la formule suivante :

Équation 2 Spécificité (Sp)

$$Sp = \frac{d}{b + d}$$

Les valeurs possibles de la spécificité varient de 0 à 1, où 0 indique une spécificité nulle et 1 signifie une spécificité parfaite.

L'indice de dépendance extrême symétrique (IDES)

L'IDES est une mesure qui décrit la validité d'une prévision d'un événement rare. L'IDES est calculé à l'aide de la formule suivante :

Équation 3 IDES

$$IDES = \frac{\log(1 - Sp) - \log S - \log Sp + \log(1 - S)}{\log(1 - Sp) + \log S + \log Sp + \log(1 - S)}$$

où : Sp (spécificité) = $d / (b + d)$;

S (sensibilité) = $a / (a + c)$.

Les valeurs possibles de l'IDES varient de -1 à 1, où 0 ou moins indique une performance qui n'est pas supérieure à celle d'un système régi par le hasard, et 1 signifie une performance parfaite.

L'erreur type de l'IDES est estimée par l'équation 4 :

Équation 4 Erreur type de l'IDES (S_{IDES})

$$S_{IDES} = \frac{2 \left| \frac{(1-S)(1-F)+SF}{(1-S)(1-F)} \log[F(1-S)] + \frac{2S}{1-S} \log[S(1-F)] \right|}{S\{\log[F(1-S)] + \log[S(1-F)]\}^2} \sqrt{\frac{S(1-S)}{pn}}$$

où : S (sensibilité) = $a / (a + c)$;

$F = b / (b + d)$;

$p = (a + c) / (a + b + c + d)$;

$n = a + b + c + d$.

3.6.3 L'INTENSITÉ DES VAGUES DE CHALEUR : DEGRÉS-JOURS CUMULÉS

Les degrés-jours cumulés estiment l'intensité d'une vague de chaleur, en tenant compte de sa durée et des températures observées. Ils permettent de comparer les vagues de chaleur selon leur intensité et aussi d'examiner le lien entre l'intensité des vagues de chaleur et leur prévision (Lebel, Bustinza et Dubé, 2017). Les degrés-jours cumulés représentent le cumul, pendant la durée de la canicule, des écarts moyens entre les températures quotidiennes observées (maximales et minimales) et les valeurs-seuils de chaleur extrême (voir équation 5).

Équation 5 Degrés-jours cumulés

Degrés – jours cumulés =

$$\sum_{j=1}^n \frac{(Temp\ max_j - Seuil\ max_j) + (Temp\ min_j - Seuil\ min_j)}{2}$$

Ce concept des degrés-jours cumulés est inspiré et utilisé par exemple en agriculture, pour déterminer les types de cultures par secteur (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2016), ainsi qu'en économie, pour établir les dépenses en énergie pour le chauffage et la climatisation (Météo France, 2016).

4 Résultats

4.1 Le nombre d'avertissements de chaleur extrême et de vagues de chaleur

Au Québec, de 2010 à 2016, le système SUPREME a émis 90 ACE, ce qui correspond à une moyenne saisonnière de 0,25 ACE par RPM (tableau 3). La vaste majorité des ACE (76/90 ou 84 %) a été émise dans les RPM de la classe 2.

Tableau 3 Nombre d'avertissements de chaleur extrême selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016

Classe météorologique (nombre de RPM)	Nombre d'ACE	Moyenne saisonnière du nombre d'ACE par RPM
Classe 1 (6)	7	0,18
Classe 2 (13)	76	0,80
Classe 3 (33)	7	0,03
Total (52)	90	0,25

Note : avant 2012, deux régions de prévisions de la classe 1 étaient dans la classe 2. Les moyennes ont donc été calculées en considérant le nombre de régions météorologiques réel en fonction de la période.

En ce qui concerne les vagues de chaleur observées, 98 vagues de chaleur ont été repérées pendant la période à l'étude, ce qui correspond à une moyenne saisonnière de 0,27 vague de chaleur par RPM (tableau 4). Comme dans le cas des ACE, la plupart des vagues de chaleur (64/98 ou 65 %) se concentrent dans les RPM de la classe 2.

Le nombre d'ACE et de vagues de chaleur par RSS est présenté à l'annexe 3. Certaines caractéristiques de chacune des vagues de chaleur (comme la date du début et la durée) apparaissent à l'annexe 4.

Tableau 4 Nombre de vagues de chaleur selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016

Classe météorologique (nombre de RPM)	Nombre de vagues de chaleur	Moyenne saisonnière du nombre de vagues de chaleur par RPM
Classe 1 (6)	8	0,21
Classe 2 (13)	64	0,67
Classe 3 (33)	26	0,11
Total (52)	98	0,27

Note : avant 2012, deux régions de prévisions de la classe 1 étaient dans la classe 2. Les moyennes ont donc été calculées en considérant le nombre de régions météorologiques réel en fonction de la période.

Pour l'ensemble des classes, des 98 vagues de chaleur repérées au Québec de 2010 à 2016, 47 ont été prévues par les ACE (« vague de chaleur observée » et « ACE émis ») et 51 ont été manquées (« vague de chaleur observée » et « pas d'ACE émis ») (tableau 5). De plus, des 90 ACE émis, 43 étaient faux (« pas de vague de chaleur observée » et « ACE émis »). Les tableaux de contingence des ACE en fonction des classes météorologiques sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5 Tableaux de contingence des avertissements de chaleur extrême selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016

	Vague de chaleur observée	Pas de vague de chaleur observée
Classe 1		
ACE émis	2	5
Pas d'ACE émis	6	5 801
Classe 2		
ACE émis	41	35
Pas d'ACE émis	23	14 436
Classe 3		
ACE émis	4	3
Pas d'ACE émis	22	35 314
Total des classes		
ACE émis	47	43
Pas d'ACE émis	51	55 551

4.2 La performance des avertissements de chaleur extrême

4.2.1 LA SENSIBILITÉ ET LA SPÉCIFICITÉ

La sensibilité des ACE pour l'ensemble des classes météorologiques est de 0,48, c'est-à-dire que 48 % des vagues de chaleur ont été prévues (tableau 6). Les ACE de la classe 2 présentent la sensibilité la plus élevée (0,64), tandis que ceux de la classe 3 présentent la plus basse (0,15).

Quant à la spécificité des ACE, tant pour l'ensemble des classes que pour chacune des classes, elle est proche de 1, c'est-à-dire quasi parfaite (tableau 6). Autrement dit, presque tous les jours sans vague de chaleur ont été prévus (absence d'ACE).

La sensibilité et la spécificité par RSS sont détaillées à l'annexe 3.

Tableau 6 Sensibilité et spécificité des avertissements de chaleur extrême selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016

Classe météorologique (nombre de RPM)	Avertissement de chaleur extrême	
	Sensibilité	Spécificité
Classe 1 (6)	0,25	1,00
Classe 2 (13)	0,64	0,98
Classe 3 (33)	0,15	1,00
Total (52)	0,48	1,00

Note : avant 2012, deux régions de prévisions de la classe 1 étaient dans la classe 2.

4.2.2 L'INDICE DE DÉPENDANCE SYMÉTRIQUE

L'IDES des ACE pour l'ensemble des classes météorologiques est de 0,83 (tableau 7). Les ACE de la classe 2 présentent la performance la plus élevée (0,88), alors que les ACE des classes 1 et 3 présentent des performances inférieures équivalentes (0,67).

D'un autre côté, la moyenne saisonnière du nombre de faux ACE par RPM pour l'ensemble des classes est de 0,12. La classe 3 est celle qui présente la moyenne la plus basse (0,01), alors que la classe 2 présente la plus élevée (0,37) (tableau 7).

L'IDES et la moyenne saisonnière de faux ACE par RSS sont présentés à l'annexe 3.

Tableau 7 Indice de dépendance extrême symétrique et moyenne saisonnière du nombre de faux avertissements selon les classes météorologiques, Québec, 2010-2016

Classe météorologique (nombre de RPM)	Avertissements de chaleur extrême	
	IDES (S _{IDES})	Moyenne saisonnière du nombre de faux avertissements par RPM
Classe 1 (6)	0,67 (0,13)	0,13
Classe 2 (13)	0,88 (0,03)	0,37
Classe 3 (33)	0,67 (0,07)	0,01
Total (52)	0,83 (0,03)	0,12

Note : avant 2012, deux régions de prévisions de la classe 1 étaient dans la classe 2. Les moyennes ont donc été calculées en considérant le nombre de régions météorologiques réel en fonction de la période.

4.3 L'intensité des vagues de chaleur

L'intensité des vagues de chaleur a été calculée à l'aide des degrés-jours cumulés. L'intensité moyenne des 98 vagues de chaleur observées au Québec pendant les saisons estivales de 2010 à 2016 est de 4,4 degrés-jours (tableau 8). Les vagues de chaleur de la classe 3 sont celles qui révèlent l'intensité moyenne la plus élevée (5,2 degrés-jours), alors que celle de la classe 2 est la plus basse (4,0 degrés-jours).

Le tableau 8 compare également l'intensité des vagues de chaleur selon qu'elles aient été prévues ou manquées par les ACE. Pour les classes 2 et 3, l'intensité moyenne des vagues de chaleur manquées est plus élevée (4,7 et 5,2 degrés-jours respectivement) que celle des vagues de chaleur prévues (3,7 et 4,9 degrés-jours respectivement). Pour la classe 1, la figure est inversée : l'intensité moyenne des 2 vagues de chaleur prévues est plus élevée (7,2 degrés-jours) que celle des 6 vagues de chaleur manquées (3,8 degrés-jours).

L'intensité moyenne des vagues de chaleur par RSS est présentée à l'annexe 3 et les intensités de chacune des vagues de chaleur sont montrées à l'annexe 4.

Tableau 8 Intensité moyenne des vagues de chaleur, Québec, 2010-2016

Classe météorologique	Degrés-jours cumulés moyens (n*)	Degrés-jours moyens selon la prévision des vagues de chaleur (n*)	
		Prévues	Manquées
Classe 1	4,7 (8)	7,2 (2)	3,8 (6)
Classe 2	4,0 (64)	3,7 (41)	4,7 (23)
Classe 3	5,2 (26)	4,9 (4)	5,2 (22)
Total	4,4 (98)	4,0 (47)	4,8 (51)

* n = nombre de vagues de chaleur

5 Discussion

Selon l'IDES, les ACE du système SUPREME sont fiables. Un IDES assez élevé de 0,8 avec une erreur type faible de 0,03 permet d'attribuer aux ACE du système SUPREME une assez bonne performance pour un système binaire. Comme indiqué auparavant, les valeurs possibles de l'IDES varient de -1 à 1, où 0 et moins indique une performance qui n'est pas supérieure à celle d'un système régi par le hasard, et 1 une performance parfaite.

Cette bonne fiabilité des ACE a été d'ailleurs attestée par les utilisateurs du système SUPREME lors des trois évaluations (Bustinza, 2015; Bustinza, Toutant, Gosselin & Bélanger, 2011; Kishchuk, N, 2012). En effet, les utilisateurs apprécient l'accès en temps quasi réel aux données météorologiques et sanitaires fourni par le système SUPREME. Les ACE, particulièrement, sont jugés « très utiles » ou « utiles » par 91 % des répondants (Bustinza, 2015).

Les résultats confirment que, du point de vue météorologique, les vagues de chaleur au Québec sont des événements rares. Dans la présente étude, seulement 98 vagues de chaleur ont été observées durant les 55 692 jours-régions à l'étude (7 saisons estivales dans 52 RPM).

La sensibilité indique que seulement 48 % des vagues de chaleur ont été correctement prévues par les ACE. En revanche, la spécificité des ACE était presque parfaite. Ainsi, pour presque 100 % des journées sans vague de chaleur, le système SUPREME n'a pas émis des ACE.

En résumé, en ce qui concerne la performance des ACE du système SUPREME, d'une part, la performance est bonne selon l'IDES, et presque parfaite selon la spécificité. D'autre part, la performance est piètre selon la sensibilité. Ces résultats contradictoires étaient attendus, comme expliqué dans la prochaine section.

5.1 La pertinence de l'IDES et les limites des mesures d'évaluation traditionnelles

La sensibilité et la spécificité sont deux mesures faciles à calculer et dont le sens est aisément saisissable. D'un côté, la sensibilité, dans le domaine de la météorologie, mesure la proportion d'événements observés qui ont été prévus (émission d'un avertissement). Dans le domaine de la santé, la sensibilité estime, par exemple, la proportion de personnes malades qui obtiennent un test de dépistage positif (vrai positif). D'un autre côté, la spécificité mesure, dans le domaine de la météorologie, la proportion de jours sans événement pour lesquels des avertissements n'ont pas été émis. Dans le domaine de la santé, la spécificité estime, par exemple, la proportion de non-malades qui ont eu un test de dépistage négatif (vrai négatif). Ces deux mesures, la sensibilité et la spécificité, sont adéquates pour la plupart des événements météorologiques, toutefois, lorsque l'événement étudié devient rare, tant la sensibilité que la spécificité peuvent conduire à des résultats qui tendent rapidement vers des valeurs dépourvues de signification (Stephenson et collab., 2008).

Pour illustrer ce phénomène, Ferro (2007) présente un exemple des variations des sensibilités et des spécificités d'un système de prévisions de précipitations pluviales pour différentes valeurs-seuils (figure 1). Il est bien connu que la fréquence d'un certain événement dépend de sa définition, c'est-à-dire des valeurs-seuils choisies. Ainsi, plus les valeurs-seuils seront élevées, plus la fréquence de l'événement sera faible et plus l'événement sera considéré comme rare.

Figure 1 Sensibilité, spécificité et IDES d'un système de prévision de précipitations pluviales en fonction des valeurs-seuils

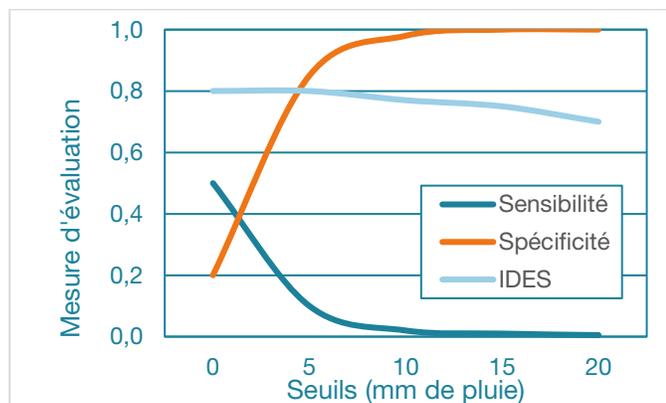


Figure adaptée de Ferro (2007) et de Ferro et Stephenson (2011).

La figure 1 illustre que, pour un même système de prévision, la sensibilité et la spécificité tendent vers des valeurs dépourvues de signification (0 et 1 respectivement), à mesure que l'évènement devient rare (élévation des valeurs-seuils). Ceci est une caractéristique commune à la plupart des mesures d'évaluation d'un système de prévisions (Stephenson et collab., 2008). En revanche, l'IDES conserve des valeurs cohérentes, même lorsque la rareté de l'évènement augmente.

D'autre part, les mesures traditionnelles, prises individuellement, évaluent les systèmes de prévisions de manière fragmentaire. En effet, il est possible de constater que le calcul de la sensibilité (« $a / [a + c]$ ») ne tient pas compte des faux avertissements (« b ») dans sa formulation, et que la spécificité (« $d / [b + d]$ ») ne tient pas compte des vagues de chaleur manquées (« c »). À la différence de ces deux mesures, l'IDES tient compte de tous les éléments du tableau de contingence (équation 3). Ceci permet à l'IDES d'exprimer une appréciation intégrale de la performance des prévisions. Un autre avantage de l'IDES réside dans le fait que son erreur type est en général petite, même pour les évènements avec une fréquence très faible comme les vagues de chaleur (Hitchens et Brooks, 2014).

Ainsi, l'utilisation de mesures d'évaluation traditionnelles, telles que la sensibilité ou la spécificité, ne semble pas être pertinente dans le cas des systèmes de prévision d'évènements rares. Au

contraire, la littérature scientifique confirme le bien-fondé de l'utilisation des mesures de performance qui conservent des valeurs cohérentes, peu importe la fréquence des évènements, tels que l'IDES. De plus, celles-ci évaluent de façon intégrale le système de prévision, et les erreurs types sont généralement faibles.

5.2 Nombre élevé de vagues de chaleur manquées

Quoique la performance globale des ACE soit bonne selon l'IDES, il reste qu'un nombre élevé de vagues de chaleur est manqué par les ACE. Des 98 vagues de chaleur observées, 51 n'ont pas été prévues par les ACE (tableau 5). Plusieurs éléments peuvent expliquer ces résultats. Premièrement, la vérification de la capacité d'ECCC à prédire la température qu'il fera signale que le pourcentage de prévisions exactes diminue avec des horizons de prévision plus importants. Par exemple, le pourcentage de prévisions en saison estivale pour la température maximale est de 96 % pour un horizon de prévision de 1 jour, de 93 % pour celui de 2 jours, et de 89 % pour celui de 3 jours (Gachon et collab., 2016). Deuxièmement, le critère d'évaluation des prévisions utilisé par ECCC pour comparer les températures prévues aux températures observées est très permissif : ± 3 °C. Ainsi, l'évaluation de la performance des ACE est influencée par ces incertitudes inhérentes aux prévisions météorologiques, en plus du fait de considérer des périodes de 2 ou 3 jours de prévisions, augmentant encore plus les incertitudes. L'ensemble de ces considérations expliquerait que le système SUPREME manque un nombre important de vagues de chaleur.

Les coûts d'une vague de chaleur sur le système de santé peuvent être élevés, surtout dans le cas des vagues de chaleur manquées (absence d'avertissement) et pour lesquelles des mesures de prévention et de protection de la santé n'ont pas été déployées en temps opportun. Ainsi, il est très important d'essayer de réduire le nombre de vagues de chaleur manquées.

Il serait possible de réduire le nombre de vagues de chaleur manquées en abaissant les valeurs-seuils de température utilisées pour l'émission des ACE (mais en conservant les mêmes valeurs-seuils pour l'identification des vagues de chaleur). En effet, en

réduisant les valeurs-seuils pour l'émission des ACE, le système de prévisions émettrait plus d'avertissements et, ainsi, il y aurait moins de vagues de chaleur manquées (figure 1). Une autre façon serait d'arrondir à l'unité (au lieu d'une décimale) les moyennes des températures prévues calculées pour émettre les ACE.

Cependant, avec l'abaissement des valeurs-seuils de chaleur extrême pour l'émission des ACE et l'arrondi à l'unité des moyennes des températures, il faut aussi s'attendre à une augmentation du nombre de faux ACE (figure 1). Il serait donc important de ne pas trop abaisser les valeurs-seuils d'émission des ACE afin d'éviter un nombre trop élevé de faux ACE. Toutefois, étant donné que le nombre de faux ACE est actuellement très bas (tableau 6), les impacts d'une augmentation restreinte des faux ACE sur l'organisation des activités des intervenants en santé publique ne devraient pas être significatifs.

Cette augmentation délibérée du nombre d'avertissements est commune dans les systèmes de prévision d'événements rares qui ont des impacts potentiels importants (Wilson et Giles, 2013). Bien qu'un nombre élevé d'avertissements puisse perturber la mise en place des mesures de prévention de la part des utilisateurs du système (Roulston et Smith, 2004), il a aussi été rapporté que les utilisateurs tolèrent assez bien cette augmentation lorsque les impacts potentiels sont importants (Barnes et collab., 2007).

5.3 Disparité des résultats selon les classes météorologiques

L'IDES des ACE en fonction des classes météorologiques est très variable. Ainsi, l'IDES de la classe 2 est nettement plus élevé (0,88) que celui des autres classes (0,67) (tableau 7). Il appert que cette disparité est reliée au fait que le système d'émission des ACE utilise deux méthodes différentes : l'une basée sur la considération des prévisions pour les « 2 » prochains jours (classe 2), et l'autre sur les prévisions pour les « 3 » prochains jours (classes 1 et 3) (tableau 2). Il est possible que le retranchement du troisième jour, dans le cas de la classe 2, diminue l'incertitude de la prévision, ce qui entraîne une meilleure performance. D'une part, l'existence simultanée de deux méthodologies distinctes fait en sorte que les performances des classes ne sont pas vraiment comparables, et, qu'en conséquence, la

performance calculée pour l'ensemble du système n'est pas tout à fait adéquate. D'autre part, la différence des performances entre les classes n'est peut-être pas attribuable à la qualité des prévisions, mais plutôt aux méthodologies d'émission des ACE.

Un autre problème relié à l'utilisation de deux méthodologies pour l'émission des ACE est celui du nombre très élevé d'ACE et de faux ACE de la classe 2. En effet, les RPM de la classe 2 reçoivent à elles seules 84 % des ACE (76 sur 90, tableau 3) et 81 % des faux ACE (35 sur 43, tableau 5), alors qu'elles ne représentent que 25 % des RPM (13 sur 52, tableau 3). Comme les ACE pour la classe 2 sont émis sur la considération des prévisions pour les « 2 » prochains jours seulement, il est évident qu'il est plus probable de satisfaire les critères de vague de chaleur qu'en considérant les « 3 » prochains jours. Ainsi, il est normal que les nombres d'ACE et de faux ACE soient plus élevés pour la classe 2.

Un dernier problème, non négligeable, est le manque d'uniformité entre le nombre de jours considérés pour émettre des ACE pour la classe 2 (2 jours) et la définition des vagues de chaleur extrême utilisée par l'INSPQ (3 jours ou plus). L'INSPQ produit annuellement des bilans des impacts des vagues de chaleur extrême sur la santé (Bustinza et Lebel, 2012; Bustinza, Lebel et Dubé, 2014, 2015; Bustinza et collab., 2013; Lebel et Bustinza, 2013; Lebel, Bustinza et Dubé, 2016). Dans ces bilans, la définition d'une vague de chaleur extrême considère au minimum « 3 jours » consécutifs pendant lesquels les moyennes des températures atteignent les seuils de chaleur extrême. Actuellement, en raison du manque d'harmonisation du nombre de jours évalués entre les ACE et les bilans de l'INSPQ, il est possible qu'un ACE de la classe 2 ait prévu correctement une vague de chaleur (de « 2 jours »), mais qu'aucune vague de chaleur extrême (de « 3 jours ») ne soit repérée lors des bilans annuels de l'INSPQ. En d'autres termes, une intervention des autorités de santé publique serait justifiée à l'égard de l'ACE « correct », mais probablement injustifiée quant à la définition de vague de chaleur de l'INSPQ. Ceci est déterminant dans le cadre d'une éventuelle évaluation de l'efficacité des interventions de santé publique pendant les vagues de chaleur extrême.

La raison pour laquelle l'INRS, dans son étude sur les valeurs-seuils de chaleur extrême, a proposé la considération de « 2 » ou de « 3 » jours de prévisions en fonction des classes réside dans la définition d'une vague de chaleur. En effet, une vague de chaleur a été définie par les auteurs comme le dépassement des valeurs-seuils par les températures pendant au moins 2 jours (Martel collab., 2010). Les valeurs-seuils devraient être mises à jour prochainement, car elles ont été établies il y a déjà 7 ans, et il est nécessaire de vérifier si la relation chaleur-mortalité n'a pas changé avec le temps. Ainsi, la mise à jour des valeurs-seuils devrait évaluer la nécessité de conserver les deux méthodes lors de l'émission des ACE ou, au contraire, de les harmoniser afin d'atténuer les problèmes signalés précédemment.

5.4 L'intensité des vagues de chaleur

L'intérêt de l'analyse de l'intensité des vagues de chaleur réside dans le fait que les vagues de chaleur les plus intenses sont celles qui produisent les impacts les plus importants sur la santé. Pour cette raison, les prévoir adéquatement est un objectif essentiel de tout système de surveillance et de vigie sanitaire. Une étude récente indique que les vagues de chaleur les plus intenses, comme celle de juillet 2010 au Québec, sont associées à des impacts significativement plus importants sur les décès, les hospitalisations toutes causes confondues et les admissions à l'urgence que les vagues de chaleur moins intenses (Lebel et collab., 2017).

Dans le but d'évaluer l'association entre l'intensité des vagues de chaleur et la performance des ACE du système SUPREME, l'intensité des vagues de chaleur a été calculée au moyen des degrés-jours cumulés. Cependant, l'évaluation n'a pas menée à des résultats concluants.

D'une part, étant donné que la mesure de l'intensité est basée principalement sur l'écart des températures observées par rapport aux valeurs-seuil de chaleur extrême, il était attendu que la performance des ACE soit meilleure dans le cas des vagues de chaleur les plus intenses. En effet, théoriquement, plus l'écart par rapport aux valeurs-seuils est grand, plus le système serait en mesure de prédire efficacement l'atteinte des valeurs-seuils. Toutefois, la performance (IDES) des ACE de la classe 3 (0,67), qui est la classe avec les

vagues de chaleur les plus intenses (5,2 degrés-jours), est inférieure à la performance de la classe 2 (0,88), qui est la classe avec les vagues de chaleur les moins intenses (4,0 degrés-jours) (tableaux 7 et 8).

D'autre part, mais pour les mêmes raisons, il était aussi attendu que l'intensité des vagues de chaleur prévues soit plus élevée que celle des vagues de chaleur manquées. Toutefois, les résultats indiquent que ce sont plutôt les vagues de chaleur manquées qui présentent les intensités les plus élevées (4,8 contre 4,0 degrés-jours, tableau 8). Il est possible que la disparité quant à la façon d'émettre les ACE (considération de « 2 jours » contre « 3 jours ») perturbe l'analyse du lien entre la performance des ACE et l'intensité des vagues de chaleur. Il faut aussi considérer que les ACE sont basés sur les prévisions de 2 ou de 3 jours, tandis que le calcul de l'intensité est basé sur la durée totale de la vague de chaleur qui peut s'étendre sur plus de 3 jours. Ceci peut donc aussi perturber l'analyse du lien performance-intensité.

Finalement, il est aussi possible que ces résultats s'expliquent par les faibles effectifs et par la grande variabilité des degrés-jours à l'intérieur de chacune des classes.

5.5 Forces et limites de l'étude

L'utilisation de l'IDES pour évaluer la performance des ACE du système SUPREME constitue une force méthodologique de la présente étude. En effet, l'IDES est une mesure de la performance des prévisions qui, à la différence des mesures traditionnelles, permet d'évaluer adéquatement les prévisions parce qu'il ne conduit pas à des valeurs dépourvues de signification lorsque l'évènement est rare, comme les vagues de chaleur au Québec.

Les degrés-jours cumulés utilisés pour estimer l'intensité des vagues de chaleur sont une innovation de la présente étude. Leur formulation permet une mesure adéquate de l'intensité des vagues de chaleur (Díaz et collab., 2006), car ils tiennent compte des deux aspects des vagues de chaleur associés à leur impact potentiel sur la santé humaine, c'est-à-dire l'importance des températures (mesurée par leurs écarts par rapport aux seuils) pendant la vague de chaleur, et la durée de la vague de chaleur (mesurée à l'aide du cumul des écarts).

Une limite de l'étude concerne l'utilisation des données de températures des stations de référence pour évaluer la performance des ACE. En effet, les RPM peuvent couvrir de vastes territoires. Ainsi, le fait qu'une station de référence soit représentative de la situation météorologique de l'ensemble de la RPM, comme l'affirme ECCC, peut être remis en question. Ceci a pu provoquer des erreurs dans le classement des ACE dans les tableaux de contingence et des impacts sur la mesure de la performance (IDES) du système. Cependant, d'autres solutions, comme la moyenne des températures de plusieurs stations de la RPM, ne rendent pas nécessairement meilleure la représentativité météorologique globale de la RPM. À l'heure actuelle, il est considéré que l'utilisation des températures d'une station de référence est la meilleure alternative pour statuer sur la validité des prévisions.

6 Conclusion

En conclusion, la performance globale du système SUPREME concernant l'émission des ACE mesurée avec l'IDES est bonne. De plus, l'IDES est une mesure d'évaluation adéquate pour les ACE étant donné qu'il produit des résultats toujours cohérents malgré la rareté des vagues de chaleur. Par contre, les mesures d'évaluation traditionnelles, telles que la sensibilité et la spécificité, ne sont pas indiquées pour les ACE car elles peuvent conduire à des mesures de performance dépourvues de signification ou fragmentaires.

Le système SUPREME présente néanmoins un nombre élevé de vagues de chaleur manquées. Pour pallier cette situation, il serait possible d'abaisser les valeurs-seuils d'émission d'ACE ou d'arrondir les moyennes des températures prévues utilisées pour émettre des ACE. Ceci aurait comme effet de réduire le nombre de vagues de chaleur manquées. Ces propositions devraient être discutées avec les DSP et ECCC. Le défi sera de réduire le nombre de vagues de chaleur manquées, sans provoquer pour autant une augmentation trop importante du nombre de faux avertissements.

Références

- Barnes, L. R., Grunfest, E. C., Hayden, M. H., Schultz, D. M. et Benight, C. (2007). False alarms and close calls: a conceptual model of warning accuracy. *Weather and Forecasting*, 22(5), 1140-1147.
- Bustinza, R. et Lebel, G. (2012). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2011*. Institut national de santé publique du Québec. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1508_survimpactssanivagueschaleurextremeqc_bilan2011.pdf
- Bustinza, R., Lebel, G. et Dubé, M. (2014). Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2013. *Bulletin d'information en santé environnementale*. Repéré sur le site de l'Institut national de santé publique du Québec : https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/documents/bise/surveillance_chaleur_extreme_2013.pdf
- Bustinza, R., Lebel, G. et Dubé, M. (2015). Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2014. *Bulletin d'information en santé environnementale*. Repéré sur le site de l'Institut national de santé publique du Québec : <https://www.inspq.qc.ca/bise/surveillance-des-impacts-sanitaires-des-vagues-de-chaleur-extreme-au-quebec-bilan-de-la-saison-estivale-2014>
- Bustinza, R., Lebel, G., Gosselin, P., Bélanger, D. et Chebana, F. (2013). Health impacts of the July 2010 heat wave in Québec, Canada. *BMC Public Health*, 13, 56.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. (2016). Agrométéo Québec – Degrés-jours. Repéré à <http://www.agrometeo.org/atlas/category/base0/therm>
- Chebana, F., Martel, B., Gosselin, P., Giroux, J.-X. et Ouarda, T. B. M. J. (2013). A general and flexible methodology to define thresholds for heat health watch and warning systems, applied to the province of Québec (Canada). *International Journal of Biometeorology*, 57(4), 631-644.
- Díaz, J., García-Herrera, R., Trigo, R. M., Linares, C., Valente, M. A., De Miguel, J. M. et Hernández, E. (2006). The impact of the summer 2003 heat wave in Iberia: how should we measure it? *International Journal of Biometeorology*, 50(3), 159-166.
- Doswell, C. A., Davies-Jones, R. et Keller, D. L. (1990). On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. *Weather and Forecasting*, 5(4), 576-585.
- Ferro, C. A. T. (2007). A probability model for verifying deterministic forecasts of extreme events. *Weather and Forecasting*, 22(5), 1089-1100.
- Ferro, C. A. T. et Stephenson, D. B. (2011). Extremal dependence indices: improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events. *Weather and Forecasting*, 26(5), 699-713.
- Gachon, P., Bussièrès, L., Gosselin, P., Raphoz, M., Bustinza, R., Martin, P., ... Yagouti, A. (2016). *Guide pour l'identification des seuils d'alertes aux canicules au Canada basés sur les données probantes*. Université du Québec à Montréal. Repéré à <http://www.archipel.uqam.ca/9080/>
- Hitchens, N. M. et Brooks, H. E. (2014). Evaluation of SPC Outlooks using the Symmetric Extremal Dependence Index. Dans *Use and validation of real-time severe weather forecasts*. Wisconsin, États-Unis. Repéré à <https://ams.confex.com/ams/27SLS/webprogram/Paper254551.html>
- Lebel, G. et Bustinza, R. (2013). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2012*. Institut national de santé publique du Québec. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1688_survimpactssanitvaguechalextrqc.pdf
- Lebel, G., Bustinza, R. et Dubé, M. (2016). Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2015. *Bulletin d'information en santé environnementale*. Repéré sur le site de l'Institut national de santé publique du Québec : <https://www.inspq.qc.ca/bise/surveillance-des-impacts-sanitaires-des-vagues-de-chaleur-extreme-au-quebec-bilan-de-la-saison-estivale-2015>

- Lebel, G., Bustinza, R. et Dubé, M. (2017). *Analyse des impacts des vagues régionales de chaleur extrême sur la santé au Québec de 2010 à 2015*. Institut national de santé publique du Québec. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2221_impacts_vagues_chaleur_extreme_sante.pdf
- Martel, B., Giroux, J.-X., Gosselin, P., Chebana, F., Ouarda, T. B. M. J. et Charron, C. (2010). *Indicateurs et seuils météorologiques pour les systèmes de veille-avertissement lors de vagues de chaleur au Québec*. Institut national de santé publique du Québec. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1151_IndicVeilleAvertissementVagueChaleur.pdf
- Météo France. (2016). Degrés-jours unifiés -DJU. Repéré à <http://services.meteofrance.com/e-boutique/climatologie/dju-detail.html>
- Roulston, M. S. et Smith, L. A. (2004). The boy who cried wolf revisited: the impact of false alarm intolerance on cost-loss scenarios. *Weather and Forecasting*, 19(2), 391–397.
- Stephenson, D. B., Casati, B., Ferro, C. A. T. et Wilson, C. A. (2008). The extreme dependency score: a non-vanishing measure for forecasts of rare events. *Meteorological Applications*, 15(1), 41–50.
- Toutant, S., Gosselin, P., Bélanger, D., Bustinza, R. et Rivest, S. (2011). An open source web application for the surveillance and prevention of the impacts on public health of extreme meteorological events: the SUPREME system. *International Journal of Health Geographics*, 10, 39.
- Wilson, L. J. et Giles, A. (2013). A new index for the verification of accuracy and timeliness of weather warnings. *Meteorological Applications*, 20(2), 206–216.

Annexe 1 Régions de prévisions météorologiques couvertes par le système SUPREME et leur station météorologique de référence

RSS	Région de prévisions météorologiques	Station météorologique de référence
01	Amqui – Vallée de la Matapédia	Amqui
01	Kamouraska – Rivière-du-Loup – Trois-Pistoles	Rivière-du-Loup
01	Matane	Cap-Chat
01	Rimouski – Mont-Joli	Mont-Joli A
01	Témiscouata	Amqui
02	Lac-Saint-Jean	Roberval A
02	Saguenay	Bagotville A
03	Charlevoix	Charlevoix (MRC)
03	Québec	Québec/Jean-Lesage Intl
03	Réserve faunique des Laurentides	L'Étape
04	Drummondville – Bois-Francs	Nicolet
04	La Tuque	La Tuque
04	Mauricie	Nicolet
04	Parent – Réservoir Gouin	Parent
05	Estrie	Lennoxville
06/13*	Montréal métropolitain – Laval	Montréal/Pierre-Elliott-Trudeau Intl A
07	Gatineau	Ottawa Intl
07	Haute-Gatineau – Lièvre – Papineau	High Falls
07	Pontiac	Maniwaki airport
07	Réserve faunique La Vérendrye	Maniwaki airport
08	Abitibi	Val d'Or A
08	Témiscamingue	Barrage Témiscamingue
09	Anticosti	Port-Menier
09	Baie-Comeau	Baie-Comeau
09	Blanc-Sablon	Lourdes de Blanc-Sablon A
09	Chevery	Chevery
09	Les Escoumins – Forestville	Pointe de L'Islet

RSS	Région de prévisions météorologiques	Station météorologique de référence
09	Fermont	Wabush Lake A
09	Minganie	Havre-Saint-Pierre
09	Natashquan	Natashquan A
09	Rivière Manicouagan	Onatchiway
09	Schefferville	Schefferville
09	Sept-Îles – Port-Cartier	Sept-Îles
10	Baie-James et rivière La Grande	La Grande Rivière A
10	Chibougamau	Chibougamau Chapais A
10	LG Quatre – Laforge et Fontanges	La Grande IV
10	Matagami	Matagami
11	Îles-de-la-Madeleine	Îles-de-la-Madeleine
11	New Carlisle – Chandler	New Carlisle 1
11	Parc de la Gaspésie – Murdochville	Amqui
11	Parc national Forillon – Gaspé – Percé	Gaspé A
11	Restigouche – Bonaventure	New Carlisle 1
11	Sainte-Anne-des-Monts – Grande-Vallée	Cap-Chat
12	Beauce	Beauceville
12	Montmagny – L'Islet	La Pocatière
14	Lanaudière	L'Assomption
15	Lachute – Saint-Jérôme	Montréal/Mirabel Intl A
15	Laurentides	Saint-Jovite
15	Mont-Laurier	Maniwaki airport
15	Parc du Mont-Tremblant – Saint-Michel-des-Saints	Saint-Michel-des-Saints
16	Vaudreuil – Soulanges – Huntington	St-Anicet 1
16	Vallée du Richelieu – Saint-Hyacinthe	Montréal/St-Hubert A

* Les RSS de Montréal et de Laval sont analysées ensemble étant donné qu'elles partagent la même station météorologique de référence.

Annexe 2 Valeurs-seuils de chaleur extrême, nombre de jours à examiner et coefficients de pondération selon les régions sociosanitaires

Classes météorologiques et régions sociosanitaires	Valeurs-seuils de chaleur extrême		Nombre de jours à examiner	Coefficients de pondération J ₁ -J ₂ -J ₃
	Temp. max. (°C)	Temp. min. (°C)		
Classe 1	33	20	3	0,4-0,4-0,2
06 Montréal				
13 Laval				
14 Lanaudière				
15 Laurentides I*				
16 Montérégie				
Classe 2	31	18	2	0,5-0,5
04 Mauricie-et-Centre-du-Québec				
05 Estrie				
07 Outaouais				
12 Chaudière-Appalaches				
15 Laurentides II*				
Classe 3	31	16	3	0,4-0,4-0,2
01 Bas-Saint-Laurent				
02 Saguenay–Lac-Saint-Jean				
03 Capitale-Nationale				
08 Abitibi-Témiscamingue				
09 Côte-Nord				
10 Nord-du-Québec				
11 Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine				

* Depuis 2012, deux des quatre régions de prévisions de la RSS des Laurentides (Lachute – Saint-Jérôme et Laurentides) sont passées de la classe 2 à la classe 1.

Annexe 3 Nombre de vagues de chaleur et d'avertissements de chaleur extrême et leur performance, par classe météorologique et région sociosanitaire, Québec, 2010-2016

Classe météorologique et région sociosanitaire (nombre de RPM)	Vagues de chaleur			ACE		Performance des ACE			
	Nombre	Moyenne saisonnière par RPM	Intensité moyenne	Nombre	Moyenne saisonnière par RPM	IDES	Moyenne saisonnière du nombre de faux ACE par RPM	Sensibilité	Spécificité
Classe 1 (6)	8	0,21	4,7	7	0,18	0,67	0,13	0,25	0,9986
06 Montréal/13 Laval (1)*	2	0,29	5,4	2	0,29	0,83	0,14	0,50	0,9991
14 Lanaudière (1)	2	0,29	2,1	1	0,14	NA	0,14	0,00	0,9991
16 Montérégie (2)	4	0,29	5,5	4	0,29	0,66	0,21	0,25	0,9986
15 Laurentides I (2)**	0	0,00	-	0	0,00	NA	0,00	-	1,0000
Classe 2 (13)	64	0,67	4,0	76	0,80	0,88	0,37	0,64	0,9776
04 Mauricie-et-Centre-du-Québec (4)	13	0,46	5,1	13	0,46	0,84	0,21	0,54	0,9986
05 Estrie (1)	5	0,71	4,2	5	0,71	0,87	0,29	0,60	0,9981
07 Outaouais (4)	30	1,07	3,7	39	1,39	0,91	0,61	0,73	0,9960
12 Chaudière-Appalaches (2)	4	0,29	4,4	6	0,43	0,64	0,36	0,25	0,9977
15 Laurentides II (2)**	12	0,67	3,7	13	0,72	0,90	0,28	0,67	0,9982
Classe 3 (33)	26	0,11	5,2	7	0,03	0,67	0,01	0,15	0,9999
01 Bas-Saint-Laurent (5)	2	0,06	5,1	0	0,00	NA	0,00	0,00	1,0000
02 Saguenay-Lac-Saint-Jean (2)	8	0,57	6,3	1	0,07	NA	0,00	0,13	1,0000
03 Capitale-Nationale (3)	2	0,10	7,4	4	0,19	0,83	0,14	0,50	0,9991
08 Abitibi-Témiscamingue (2)	9	0,64	4,7	2	0,14	NA	0,00	0,22	1,0000
09 Côte-Nord (11)	0	0,00	-	0	0,00	NA	0,00	-	1,0000
10 Nord-du-Québec (4)	3	0,11	3,2	0	0,00	NA	0,00	0,00	1,0000
11 Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (6)	2	0,05	4,1	0	0,00	NA	0,00	0,00	1,0000
Total des classes (52)	98	0,27	4,4	90	0,25	0,83	0,12	0,48	0,9992

* Les RSS de Montréal et de Laval sont analysées ensemble étant donné qu'elles partagent la même station météorologique de référence.

** Depuis 2012, deux des quatre régions de prévisions de la RSS des Laurentides (Lachute – Saint-Jérôme et Laurentides) sont passées de la classe 2 à la classe 1. Les moyennes ont été donc calculées en conséquence.

NA = Non applicable (étant donné que le calcul de l'IDES est impossible si une ou plusieurs des fréquences du tableau de contingence est égale à zéro).

Annexe 4 Portrait des vagues de chaleur par classe météorologique et région de prévisions météorologiques, Québec, 2010-2016

RSS	Région de prévisions météorologiques	Date du début de la canicule	Durée (jours)	Intensité (degrés-jours)
Classe 1			4,1	4,7
06	Montréal Métropolitain – Laval	5 juill. 2010	4	8,0
16	Vallée du Richelieu – Saint-Hyacinthe	6 juill. 2010	3	6,5
16	Vaudreuil – Solanges – Huntington	4 juill. 2010	6	6,2
16	Vaudreuil – Solanges – Huntington	21 juill. 2011	3	5,0
14	Lanaudière	5 juill. 2010	5	4,5
16	Vallée du Richelieu – Saint-Hyacinthe	20 juill. 2011	4	4,5
06	Montréal Métropolitain – Laval	20 juill. 2011	4	2,9
14	Lanaudière	20 juill. 2011	4	(0,3)
Classe 2			2,9	4,0
07	Gatineau	4 juill. 2010	6	14,6
15	Lachute – Saint-Jérôme	4 juill. 2010	6	12,3
04	Drummondville – Bois-Francs	5 juill. 2010	5	11,3
04	Mauricie	5 juill. 2010	5	11,3
05	Estrie	5 juill. 2010	5	10,8
07	Gatineau	14 juill. 2013	6	9,0
12	Montmagny – L'Islet	30 août 2010	3	8,0
04	La Tuque	6 juill. 2010	4	7,7
07	Pontiac	5 juill. 2010	4	7,4
07	Réserve faunique La Vérendrye	5 juill. 2010	4	7,4
15	Mont-Laurier	5 juill. 2010	4	7,4
12	Beauce	5 juill. 2010	5	7,1
07	Gatineau	14 juill. 2012	4	6,9
07	Haute-Gatineau – Lièvre – Papineau	5 juill. 2010	4	6,6
07	Gatineau	20 juin 2012	3	5,6
04	Drummondville – Bois-Francs	15 juill. 2013	3	5,1
04	Mauricie	15 juill. 2013	3	5,1

RSS	Région de prévisions météorologiques	Date du début de la canicule	Durée (jours)	Intensité (degrés-jours)
15	Lachute – Saint-Jérôme	20 juill. 2011	4	4,8
07	Gatineau	17 juill. 2011	7	4,7
04	Drummondville – Bois-Francs	20 juin 2012	3	4,7
04	Mauricie	20 juin 2012	3	4,7
07	Gatineau	10 août 2016	2	4,7
05	Estrie	20 juin 2012	2	4,2
04	Drummondville – Bois-Francs	21 juill. 2011	2	4,1
04	Mauricie	21 juill. 2011	2	4,1
04	Drummondville – Bois-Francs	30 août 2010	3	3,5
04	Mauricie	30 août 2010	3	3,5
07	Gatineau	31 août 2010	2	3,5
15	Laurentides	6 juill. 2010	2	3,4
05	Estrie	21 juill. 2011	2	3,4
07	Gatineau	28 juill. 2015	3	3,4
07	Pontiac	20 juin 2012	2	3,3
07	Réserve faunique La Vérendrye	20 juin 2012	2	3,3
15	Mont-Laurier	20 juin 2012	2	3,3
15	Parc du Mont-Tremblant - Saint-Michel-des-Saints	6 juill. 2010	2	3,0
07	Gatineau	4 août 2016	2	3,0
15	Lachute – Saint-Jérôme	25 mai 2010	2	2,9
07	Gatineau	6 juill. 2012	2	2,7
07	Haute-Gatineau – Lièvre – Papineau	20 juin 2012	2	2,5
07	Gatineau	22 juill. 2012	2	2,4
15	Lachute – Saint-Jérôme	30 août 2010	3	2,1
07	Haute-Gatineau – Lièvre – Papineau	10 août 2016	2	2,0
05	Estrie	31 août 2010	2	1,8
07	Pontiac	31 août 2010	2	1,8
07	Réserve faunique La Vérendrye	31 août 2010	2	1,8
15	Mont-Laurier	31 août 2010	2	1,8
07	Haute-Gatineau – Lièvre – Papineau	21 juill. 2011	2	1,8

RSS	Région de prévisions météorologiques	Date du début de la canicule	Durée (jours)	Intensité (degrés-jours)
07	Gatineau	17 août 2015	2	1,8
07	Pontiac	20 juill. 2011	4	1,7
07	Réserve faunique La Vérendrye	20 juill. 2011	4	1,7
15	Mont-Laurier	20 juill. 2011	4	1,7
12	Montmagny – L'Islet	14 juill. 2013	2	1,7
07	Gatineau	22 juill. 2016	2	1,7
15	Laurentides	21 juill. 2011	2	1,4
07	Haute-Gatineau – Lièvre – Papineau	16 juill. 2013	2	1,3
07	Haute-Gatineau – Lièvre – Papineau	31 août 2010	2	1,2
12	Beauce	31 août 2010	2	1,0
05	Estrie	16 juill. 2013	2	0,9
07	Pontiac	16 juill. 2013	2	0,9
07	Réserve faunique La Vérendrye	16 juill. 2013	2	0,9
15	Mont-Laurier	16 juill. 2013	2	0,9
04	La Tuque	17 juill. 2013	2	0,7
07	Gatineau	6 sept. 2015	2	0,3
04	La Tuque	30 juin 2014	3	0,2
Classe 3			3,5	5,2
03	Québec	5 juill. 2010	5	12,7
02	Lac-Saint-Jean	29 août 2010	4	12,4
02	Saguenay	29 août 2010	4	10,0
02	Saguenay	29 juin 2014	4	7,5
08	Témiscamingue	5 juill. 2010	4	7,0
02	Lac-Saint-Jean	29 juin 2014	3	6,9
08	Témiscamingue	14 juill. 2013	5	6,0
02	Saguenay	4 juill. 2013	3	5,9
08	Abitibi	12 juill. 2012	3	5,4
01	Amqui – Vallée de la Matapédia	30 juin 2014	3	5,1
01	Témiscouata	30 juin 2014	3	5,1
11	Parc de la Gaspésie – Murdochville	30 juin 2014	3	5,1

RSS	Région de prévisions météorologiques	Date du début de la canicule	Durée (jours)	Intensité (degrés-jours)
08	Témiscamingue	12 juill. 2012	4	4,7
08	Témiscamingue	30 août 2010	3	4,3
08	Témiscamingue	20 juill. 2011	3	4,3
02	Saguenay	31 juill. 2012	3	3,9
08	Abitibi	24 mai 2010	3	3,9
10	Matagami	29 août 2010	3	3,6
08	Abitibi	30 août 2010	3	3,5
11	Parc national Forillon – Gaspé – Percé	30 juin 2014	4	3,2
08	Témiscamingue	26 juill. 2015	5	3,2
10	Matagami	12 juill. 2012	3	3,0
10	Matagami	24 mai 2010	3	2,9
02	Saguenay	14 juill. 2013	3	2,5
03	Québec	15 juill. 2013	3	2,1
02	Saguenay	3 août 2016	3	1,5
Total des vagues de chaleur			3,2	4,4

Centre d'expertise
et de référence

www.inspq.qc.ca