

**ANALYSES DES VAGUES DE CHALEUR SURVENUES DEPUIS LE DÉBUT
DU 20^e SIÈCLE DANS TROIS VILLES PRINCIPALES DU SUD-EST DU
CANADA**

MARIE-LORE BEAUDRY

Thèse soumise à l'Université d'Ottawa
dans le cadre des exigences du
Programme de Maîtrise ès sciences en géographie

Département de géographie, environnement et géomatique
Faculté des arts
Université d'Ottawa

© Marie-Lore Beaudry, Ottawa, Canada, 2021

Résumé

Au cours des dernières années, des recherches réalisées à grande échelle ont permis de démontrer une augmentation de la fréquence, de l'intensité et/ou la durée des vagues de chaleur (VC) dans plusieurs régions du globe depuis le milieu du 20^e siècle. Or, au Canada, les tendances historiques du phénomène ont été peu explorées. Dans ce contexte, la recherche qui suit a permis de mettre en lumière les tendances des VC de trois régions métropolitaines de recensement (RMR) du sud-est du Canada, soit Montréal, Ottawa et Toronto, afin de déterminer si le phénomène s'est amplifié au pays comme dans certaines autres régions du monde, et ce depuis le début du 20^e siècle.

Dans le cadre de cette recherche, des analyses statistiques ont été réalisées grâce aux données météorologiques historiques canadiennes récoltées sur la plateforme d'Environnement Canada. Plusieurs caractéristiques des VC, telles que la fréquence annuelle, la durée maximale et totale, l'intensité maximale, ainsi que la date du premier événement annuel, ont été explorées selon une gamme de seuils. De plus, les températures ressenties en période de VC de même que les tendances du phénomène dans les régions rurales situées aux abords des RMR préalablement identifiées ont été étudiées. Les conclusions de l'étude indiquent qu'il ne semble pas exister de tendance significative à la hausse ou à la baisse pour aucune des caractéristiques des VC dans les trois RMR canadiennes étudiées, pendant la période d'étude couverte. Ceci signifie donc que les événements de VC ne se sont pas amplifiés dans la région d'étude entre le début des années 1900 et le présent.

Mots-clés : vague de chaleur, changement climatique, événement extrême, Canada, Humidex.

Abstract

In recent years, large-scale studies have shown an increase in the frequency, intensity, and/or duration of heat waves (HW) in several regions of the world since the mid-20th century. However, in Canada, historical trends of the phenomenon have been little explored. In this context, the following research sheds light on the trends of HW in three regions located in southeastern Canada, namely Montreal, Ottawa and Toronto, in order to determine whether the phenomenon has amplified in the country as in certain other regions of the world since the beginning of the 20th century.

As part of this research, statistical analyses were carried out using historical Canadian meteorological data collected on the Environment Canada platform. Several characteristics of the phenomenon, such as annual frequency, maximum and total duration, maximum intensity, as well as the date of the first annual event, were explored according to a range of thresholds. In addition, Humidex measures collected during the HW period as well as the trends of the phenomenon in the rural regions located on the outskirts of previously identified CMA were studied. The study's findings indicate that there does not appear to be any significant upward or downward trend for any of the HW characteristics in the three Canadian regions studied. This therefore means that the HW events did not amplify in the study regions between the early 1900s and the present.

Keywords: heat wave, climate change, extreme event, Canada, Humidex.

Table des matières

Résumé	II
Abstract	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VIII
Liste des sigles et abréviations	IX
Remerciements	X
Préambules	XI
Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Hypothèse et objectifs de recherche	3
Chapitre 2 Revue de la littérature	4
2.1 La hausse des vagues de chaleur au niveau mondial	4
2.2 Projections des vagues de chaleur au 21 ^e siècle	7
2.3 Définition d'une vague de chaleur	7
2.3.1 Définitions canadiennes des vagues de chaleur	9
2.4 Caractéristiques physiques de la vague de chaleur	12
2.5 Historique des vagues de chaleur au Canada	13
2.5.1 Réchauffement climatique canadien	13
2.5.2 Événements de chaleur extrême	15
2.6 Les températures ressenties en période de vagues de chaleur	18
2.7 Impacts des vagues de chaleur	20
2.8 L'effet de l'îlot de chaleur urbain	23
Chapitre 3 Méthodologie détaillée	26
3.1 Sélection des sites d'étude	26
3.2 Description des sites d'études	26
3.2.1 Ottawa	26
3.2.2 Montréal	27
3.2.3 Toronto	28
3.3 Récolte de données	30
3.4 Analyses	32
3.4.1 Analyse du climat régional	32
3.4.2 Analyse des vagues de chaleur	33
3.4.3 Périodes de chaleur accablante	34
3.4.4 Analyse de la température ressentie	35
3.4.5 Mesurer l'effet de l'ICU	37
3.4.6 Statistiques pertinentes pour l'analyse	37
3.4.7 Logiciel	40
Chapitre 4 Tendances des vagues de chaleur au sud-est du Canada depuis le début du 20^e siècle	42
4.1 Introduction	42
4.2 Revue de la littérature	43
4.2.1 Tendances mondiales	43
4.2.2 Événement de chaleur au sud-est du Canada	44
4.2.3 Définition	45
4.2.4 Humidex et îlot de chaleur urbain	47
4.3 Méthodologie	49

4.3.1	Sites d'étude	49
4.3.2	Données	49
4.3.3	Analyses	51
4.4	Résultats	53
4.4.1	Températures et précipitations	53
4.4.2	Vagues de chaleur	59
4.4.3	Humidex et périodes de chaleur accablante	73
4.4.4	Effet de l'îlot de chaleur urbain	78
4.5	Discussion	80
4.5.1	Vagues de chaleur	80
4.5.2	Humidex	84
4.5.3	Effet de l'îlot de chaleur urbain	85
4.6	Conclusion	86
Chapitre 5 Sommaire, limitations et considérations futures		87
5.1	Sommaire des résultats	87
5.2	Discussion	88
5.3	Limitations de l'étude	90
5.4	Considérations futures	91
5.5	Contributions	92
Bibliographie		93
ANNEXE A – CODE RSTUDIO		101

Liste des figures

<i>Figure 1. Nombre moyen de journée chaude (en pourcentage) et durée maximale des VC (en jour) entre 1880 et 2005 pour l'Europe de l'Ouest (Della-Marta et al., 2007).....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 2. Critères d'avertissement de chaleur pour l'ensemble du Canada (ECCC, 2020).....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 3. Cartes synoptiques de l'Amérique du Nord, présentant la pression au niveau de la mer (hPa), les cellules de basses et hautes pressions et la hauteur du géopotential (500 mb) d'une journée chaude survenue 17 juillet 1953 pendant période de VC en Ontario (Centre météorologique de l'UQAM, 2019)....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 4. Changements observés dans le nombre annuel de journées chaudes (lorsque la température maximale quotidienne est supérieure à 30 °C). Les changements sont calculés selon les tendances linéaires lors de la période de 1948 à 2016. Les triangles solides indiquent des tendances d'importance significative à un niveau de 5%.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 5. Relation entre la température et la mortalité de 7 villes canadiennes (Gatineau, Laval, Longueuil, Montréal, Québec, Saguenay et Sherbrooke) (Santé Canada, 2011b).....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 6. Relation entre la température et l'ICU entre la nuit et le jour (Santé Canada, 2011b).....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 7. Températures et précipitations pour les normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 pour Ottawa Macdonald-Cartier Int'l A (ECCC, 2018).....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 8. Températures et précipitations pour les normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 pour Montréal Pierre Elliott Trudeau Int'l A (ECCC, 2018).</i>	<i>28</i>
<i>Figure 9. Températures et précipitations pour les normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 pour Toronto Lester B. Pearson Int'l A (ECCC, 2018).</i>	<i>29</i>
<i>Figure 10. Stations à l'étude.</i>	<i>32</i>
<i>Figure 11. Exemple des composantes analysées concernant les VC sur un mois.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 12. Le facteur Humidex selon la température et le point de rosée entre 20°C et 50°C (Anderson & al, 2013).....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 13. Critères d'avertissement de chaleur pour l'ensemble du Canada (ECCC, 2020).....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 14. Stations à l'étude.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 15. Exemple des composantes analysées concernant les VC sur un mois.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 16. Température annuelle moyenne aux sites d'étude.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 17. Température estivale moyenne aux sites d'études.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 18. Température estivale minimale moyenne aux sites d'étude.....</i>	<i>56</i>

<i>Figure 19. Température estivale maximale moyenne aux sites d'étude.</i>	57
<i>Figure 20. Moyenne estivale des précipitations aux sites d'étude.</i>	58
<i>Figure 21. Caractéristiques des VC à Ottawa entre 1890 et 2020 selon les différents seuils de 33°C, 32°C, 31°C et 30°C.</i>	61
<i>Figure 22. Caractéristiques des VC à Montréal entre 1941 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.</i>	63
<i>Figure 23. Caractéristiques des VC à Toronto entre 1937 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.</i>	65
<i>Figure 24. Caractéristiques des VC à Ottawa entre 1950 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.</i>	67
<i>Figure 25. Caractéristiques des VC à Montréal entre 1950 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.</i>	68
<i>Figure 26. Caractéristiques des VC à Toronto entre 1950 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.</i>	69
<i>Figure 27. Caractéristiques des VC à Ottawa entre 1980 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.</i>	71
<i>Figure 28. Caractéristiques des VC à Montréal entre 1980 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.</i>	72
<i>Figure 29. Caractéristiques des VC à Toronto entre 1980 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.</i>	73
<i>Figure 30. Humidex estival annuel moyen de 1953 à 2020.</i>	74
<i>Figure 31. Caractéristiques des PCA à Ottawa entre les années 1953 et 2020.</i>	75
<i>Figure 32. Caractéristiques des PCA à Montréal entre les années 1953 et 2020.</i>	76
<i>Figure 33. Caractéristiques des PCA à Toronto entre les années 1953 et 2020.</i>	77
<i>Figure 34. Comparaison de la somme des VC, du nombre de journées totales de VC, de la durée maximale de la plus longue VC et l'intensité maximale de la VC la plus intense par décennie entre Ottawa et Chelsea selon un seuil de 30°C.</i>	78
<i>Figure 35. Comparaison de la somme des VC, du nombre de journées totales de VC, de la durée maximale de la plus longue VC et l'intensité maximale de la VC la plus intense par décennie entre Oka et Montréal selon un seuil de 30°C.</i>	79
<i>Figure 36. Changements mondiaux des extrêmes chauds (GIEC, 2021).</i>	89

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. Définitions de VC selon différentes institutions canadiennes.....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 2. Humidex (H) et niveau d'inconfort ressenti (ECCC, 2018a).</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 3. Stations à l'étude.</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 4. Interprétation du coefficient de corrélation.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 5. Définitions de VC selon différentes institutions canadiennes.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 6. Humidex et niveau d'inconfort ressenti (ECCC, 2020).</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 7. Stations à l'étude.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 8. Les 10 étés les plus chauds aux différents sites d'étude.....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 9. Les 10 étés les plus humides entre les années 1953 et 2020.....</i>	<i>74</i>

Liste des sigles et abréviations

°C	<i>Degré Celsius</i>
CAC	<i>Conseil des académies canadiennes</i>
CC	<i>Changement climatique</i>
CCES	<i>Center for Climate and Energy Solutions</i>
CIUSSS	<i>Centre Intégré Universitaire de Santé et de Services Sociaux</i>
DPCA	<i>Durée maximale des périodes de chaleur accablante</i>
DVC	<i>Durée maximale des vagues de chaleur</i>
ECCC	<i>Environnement et Changements Climatiques Canada</i>
°F	<i>Degré Fahrenheit</i>
FMEQ	<i>Fédération médicale étudiante du Québec</i>
FPCA	<i>Fréquence des périodes de chaleur accablante</i>
FVC	<i>Fréquence des vagues de chaleur</i>
GIEC	<i>Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat</i>
HW	<i>Heat wave</i>
ICU	<i>Îlot de chaleur urbain</i>
INSPQ	<i>Institut national de santé publique du Québec</i>
IPCA	<i>Intensité maximale des périodes de chaleur accablante</i>
IVC	<i>Intensité maximale des vagues de chaleur</i>
MELCC	<i>Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques</i>
OMM	<i>Organisation Météorologique Mondiale</i>
PCC	<i>Prairie Climate Center</i>
PCA	<i>Période de chaleur accablante</i>
PVC	<i>Précocité des vagues de chaleur</i>
SJC	<i>Somme des journées chaudes</i>
SJCA	<i>Somme des journées de chaleur accablante</i>
SVC	<i>Somme des journées participantes aux vagues de chaleur</i>
SPCA	<i>Somme des journées participantes aux périodes de chaleur accablante</i>
RMR	<i>Régions métropolitaines de recensement</i>
VC	<i>Vague de chaleur</i>

Remerciements

Mon premier remerciement va à mon directeur de thèse, Dr André E. Viau, qui a su me superviser et me conseiller tout au long de ce processus. André a toujours été là pour me pousser et me guider, sans jamais me mettre de pression. J'aimerais également remercier les membres de mon comité, Dr Anders Knudby et Dr Eric Crighton, pour leurs conseils et directives au cours du processus.

J'aimerais ensuite remercier ma collègue et mon amie, Sydney. Merci d'avoir été là pour me motiver, me supporter dans les moments difficiles et m'aider à mettre les choses en perspective. Ces deux dernières années n'auraient pas été les mêmes sans toi ! Enfin, un merci très spécial à ma famille et mes proches, plus spécialement à ma mère Nathalie et mon amoureux Marc-André, sans qui la poursuite de mes études supérieures aurait été impossible. Merci d'avoir cru en moi.

Préambules

Cette thèse suit un format par article. Le premier chapitre introduit la problématique entourant les vagues de chaleur. Le deuxième chapitre présente la revue de littérature actuellement offerte sur le sujet et décortique la définition du phénomène. Le troisième chapitre présente les méthodes utilisées. Le quatrième chapitre comprend une ébauche d'article, dans lequel on y retrouve un sommaire des premiers chapitres ainsi que l'analyse des tendances de vagues de chaleur pour le sud-est du Canada. Ce chapitre présente également la discussion et la conclusion qui récapitulent les points abordés dans l'article. Enfin, le dernier chapitre présente un sommaire des résultats, les limitations de l'étude suivies des considérations futures.

Les données climatologiques utilisées dans le cadre de cette thèse seront disponibles sur demande et seront mises à disposition suivant la publication. Les données météorologiques nécessaires aux analyses proviennent du ministère d'Environnement et de Changement Climatique du Gouvernement fédéral canadien et elles ont été téléchargées entre juillet 2020 et juillet 2021.

Chapitre 1 Introduction

Depuis le début du 20^e siècle, les températures globales moyennes ont augmenté dû à la surproduction anthropogénique de gaz à effet de serre, or cette augmentation s'est accentuée au cours des dernières années (Field et al., 2014). En effet, selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les quatre dernières décennies ont été successivement plus chaudes que les décennies précédentes (Field et al., 2014; GIEC, 2021; OMM, 2017, 2021). Une des répercussions de ce réchauffement planétaire est l'amplification des événements météorologiques extrêmes (Basara et al., 2010; Conseil des académies canadiennes, 2019; Dahl et al., 2019; Davis et al., 2003; Field et al., 2014; GIEC, 2021; Harlan et al., 2013; Herring et al., 2019; Katz & Brown, 1992; Z. Li et al., 2018; Meehl & Tebaldi, 2004; Oudin Åström et al., 2011; PCC, 2019; Rousseau et al., 2014; Smoyer et al., 2000; Tebaldi & Wehner, 2018; Xu et al., 2016). Effectivement, au cours des dernières années, des études réalisées à grande échelle et dans différentes régions du monde ont permis de démontrer une augmentation de la fréquence, de l'intensité, de la durée et/ou de la précocité des vagues de chaleur (VC). De plus, selon les projections, ce phénomène devrait s'amplifier davantage au cours du 21^e siècle (Clark et al., 2006; GIEC, 2021; Habeeb et al., 2015; Mazdiyasni et al., 2019; Mazdiyasni & AghaKouchak, 2015; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Smith et al., 2013).

Toutefois, à l'heure actuelle, il existe un manque de compréhension quant aux tendances des extrêmes de température puisque les analyses faites sur les changements climatiques (CC) concernent généralement uniquement les températures moyennes. Ceci est dû au fait que les événements extrêmes, tels que les VC, sont très difficiles à étudier et

il est ardu de tirer des conclusions robustes quant à leurs tendances (Clark et al., 2006; Sanderson et al., 2017). De plus, il existe encore beaucoup de variabilité dans les résultats obtenus des études passées, étant donné qu'elles dépendent fortement de la façon dont les VC ont été définis (Lyon & Barnston, 2017; Perkins & Alexander, 2013). Par contre, puisque que les VC sont des événements extrêmes causant des répercussions particulièrement importantes, il devient nécessaire d'acquérir une compréhension approfondie des tendances de ce phénomène autant dans le passé, le présent que le futur (Clark et al., 2006; Mazdiyasi et al., 2019; Mazdiyasi & AghaKouchak, 2015; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Smith et al., 2013).

Au Canada, les tendances historiques du phénomène des VC ont été peu étudiées. En effet, certaines recherches ont adressé les impacts des VC, mais peu de ces études ont examiné le phénomène en termes de fréquence historique et régionale (FMEQ, 2019; PCC, 2019; Santé Canada, 2011b, 2011a). La recherche qui suit permet donc de mettre en lumière les tendances historiques des VC survenues depuis le début du 20^e siècle dans trois régions métropolitaines de recensement (RMR) du sud-est du Canada, soit Toronto, Ottawa ainsi que Montréal, afin de déterminer si les VC se sont amplifiées au pays comme ailleurs dans le monde. Les tendances des périodes de chaleur accablantes (PCA) sont également présentées afin de mieux comprendre les changements au niveau des températures ressenties depuis le milieu du siècle. Enfin, une analyse préliminaire des tendances des VC dans les régions rurales permet de mieux comprendre les répercussions du phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Les résultats de cette étude offrent donc un avancement au niveau des connaissances reliées aux VC et à leurs tendances historiques et régionales pour

les régions à l'étude. De plus, cela permet d'avoir une meilleure compréhension des répercussions des CC au pays.

1.1 Hypothèse et objectifs de recherche

Cette étude se penche sur l'analyse des tendances historiques des VC survenues dans trois RMR du sud-est du Canada, soit Montréal, Ottawa et Toronto, depuis le début du 20^e siècle. *L'hypothèse de recherche étant que les VC de ces trois RMR sont devenues plus fréquentes, intenses, longues et précoces que par le passé.* Suivant cette hypothèse, l'étude qui suit a comme objectifs principaux :

- a) D'étudier les tendances des caractéristiques des VC selon une gamme de définitions pour les trois RMR à l'étude;
- b) D'analyser l'incidence des températures ressenties (facteur Humidex) en PCA; et
- c) De fournir une analyse comparative entre les régions urbaines et rurales, afin de mieux comprendre l'effet de l'ICU lors des événements de chaleur extrême.

Chapitre 2 Revue de la littérature

2.1 La hausse des vagues de chaleur au niveau mondial

Selon plusieurs études réalisées à l'international, les VC font partie des événements météorologiques extrêmes qui auraient été amplifiés par les CC (FMEQ, 2019; GIEC, 2021; PCC, 2019; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins & Alexander, 2013; Robert W. Schlegel and Albertus J. Smit, 2018; Santé Canada, 2011a, 2011b). En effet, il existerait une corrélation entre le réchauffement du climat et l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des VC (Basara et al., 2010; FMEQ, 2019; Herring et al., 2019; Oudin Åström et al., 2011; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012). De plus, depuis le début du 21^e siècle, plusieurs VC sévères sont survenues dans diverses régions du monde (Founda et al., 2019; Mazdiyasn et al., 2019; Perkins et al., 2012; Russo et al., 2017; Smith et al., 2013).

Étant un des événements extrêmes les plus dangereux pour la santé humaine et causant un taux de mortalité élevé, plusieurs chercheurs se sont donc intéressés à l'étude de ce phénomène extrême. Malgré le fait que la grande majorité des recherches se sont concentrées à étudier les effets des VC sur la santé, certains climatologues ont également étudié les tendances historiques au niveau mondial ou continental, majoritairement en Europe, en Asie, en Australie et aux États-Unis (Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Robert W. Schlegel and Albertus J. Smit, 2018; Sanderson et al., 2017; Smith et al., 2013). Ces études réalisées dans divers pays ont permis d'établir certaines conclusions concernant le phénomène.

Premièrement, plusieurs de ces études ont permis de mettre en lumière le fait que les événements de VC ont bel et bien augmenté en fréquence au cours des dernières années dû

à la hausse des températures moyennes (GIEC, 2021; Mazdidasni et al., 2019; Mazdidasni & AghaKouchak, 2015; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Smith et al., 2013). Effectivement, dans pratiquement toutes les régions du monde, on aurait observé des changements au niveau des caractéristiques des VC, mais c'est la fréquence qui aurait augmenté le plus rapidement et de façon plus significative comparativement à la durée et l'intensité (Perkins-Kirkpatrick & Gibson, 2017; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). Plus précisément, aux États-Unis, il a été possible d'observer une augmentation de la fréquence des longs événements de chaleur (quatre jours et plus) entre les années 1950 et 2011 (Dahl et al., 2019; Mazdidasni et al., 2019; Perkins et al., 2012). De plus, les très longues VC (7 jours et plus) seraient devenues plus fréquentes aux États-Unis depuis les années 1990 (Mazdidasni & AghaKouchak, 2015). À l'est et au sud de l'Australie, on observe le même phénomène, soit que les VC sont de plus en plus fréquentes depuis 1950 (Deo et al., 2007). Enfin, dans plusieurs régions de l'Europe, on a remarqué une augmentation de la fréquence des courtes VC, alors que la fréquence des longues VC aurait diminué (Della-Marta et al., 2007; Sanderson et al., 2017). Dans cette région du globe, on remarque aussi une tendance à la hausse des VC avec Humidex élevé créant de l'inconfort et du stress thermique (Founda et al., 2019).

Deuxièmement, certaines études permettent de prouver qu'on remarque également une augmentation de l'intensité des événements de chaleur extrême même si les tendances sont assez faibles et limitées actuellement (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013). Par contre, il est possible de remarquer une légère augmentation au niveau de l'intensité maximale de l'événement de chaleur le plus extrême de l'année dans certaines régions de l'Amérique du Nord (Perkins et al., 2012). De ce fait,

l'intensité maximale aurait augmenté d'environ 0.8-1°C par décennie dans cette région (Perkins et al., 2012).

Troisièmement, il a été possible de remarquer que la durée et le nombre de journées très chaudes contribuant aux VC ont augmenté aux États-Unis, en Amérique du Sud et en Europe (Della-Marta et al., 2007; Feron et al., 2019; GIEC, 2021; Perkins & Alexander, 2013; Smith et al., 2013). Plus précisément, on observerait une augmentation significative du nombre de journées très chaudes dans le sud-est des États-Unis ainsi que dans les Grandes Plaines (Smith et al., 2013). Des tendances moins significatives du même phénomène auraient été décelées dans le nord-est du pays (Smith et al., 2013). Dans la figure 1 présentée ci-dessous, on remarque entre autre qu'en Europe de l'Ouest, le pourcentage du nombre moyen de journée chaude ainsi que la durée maximale des VC auraient augmenté voir même doublé entre 1880 et 2005 (Della-Marta et al., 2007). En Amérique du Sud, on remarque la même tendance, les journées très chaudes ont doublé pour les mois de décembre, janvier et février (Feron et al., 2019).

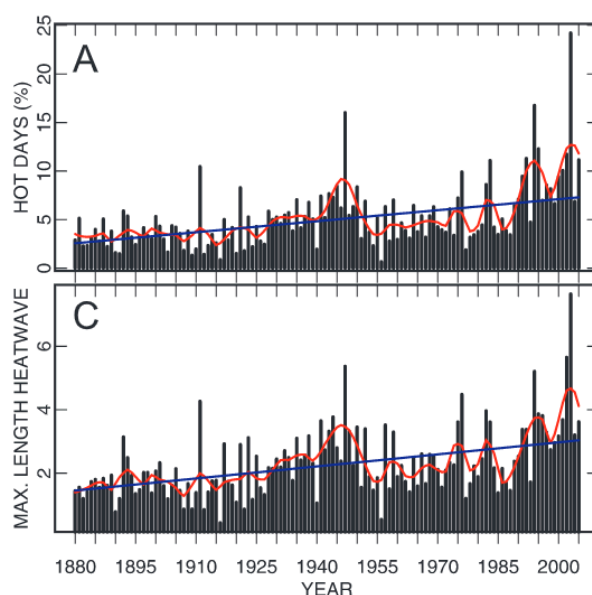


Figure 1. Nombre moyen de journée chaude (en pourcentage) et durée maximale des VC (en jour) entre 1880 et 2005 pour l'Europe de l'Ouest (Della-Marta et al., 2007).

2.2 Projections des vagues de chaleur au 21^e siècle

Selon de nombreuses projections, on devrait s'attendre à une intensification des VC sur tous les continents au cours du prochain siècle, mais particulièrement en Europe, en Amérique du Nord et du Sud, ainsi qu'à l'est de l'Asie (Clark et al., 2006; Fischer & Schär, 2010a; Khaliq et al., 2005; Meehl & Tebaldi, 2004; Perkins-Kirkpatrick & Gibson, 2017; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013). Par exemple, pour chaque augmentation de 1°C par rapport à la normale, on prévoit que la durée des VC va augmenter de 2 à 10 jours selon la région (Colombo et al., 1999; Perkins-Kirkpatrick & Gibson, 2017). En Amérique du Nord, on prévoit une augmentation importante des changements dans les extrêmes de températures maximales d'ici le milieu du 21^e siècle dû à la hausse globale des températures (Clark et al., 2006; PCC, 2019; Santé Canada, 2011a; Tebaldi & Wehner, 2018).

Le tout devrait se traduire par une amplification des VC extrême et ce sont les régions les plus peuplées qui risquent de subir les effets les plus directs (Basara et al., 2010; Davis et al., 2003; FMEQ, 2019; Meehl & Tebaldi, 2004; Oleson et al., 2015; Oudin Åström et al., 2011; PCC, 2019; Smoyer-Tomic et al., 2003). Également, dans les années à venir, les projections démontrent que les impacts découlant des VC seront de plus en plus dévastateurs (Basara et al., 2010; Oudin Åström et al., 2011; Santé Canada, 2011b, 2011a).

2.3 Définition d'une vague de chaleur

Le terme « vague de chaleur » est généralement utilisé à travers le monde et fait référence à une situation lors de laquelle les températures observées sont supérieures aux moyennes saisonnières, et ce pendant une période de temps qui perdure (Atlas climatique

du Canada, 2019; Climate data, n.d.; Deo et al., 2007; ECCC, 2020; FMEQ, 2019; PCC, 2019). Or, bien que les VC soient un phénomène courant, il est très complexe d'analyser et de modéliser leurs tendances puisqu'il n'existe pas de définition officielle du phénomène (Dahl et al., 2019; Deo et al., 2007; Lebel et al., 2017; Z. Li et al., 2018; Meehl & Tebaldi, 2004; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Sanderson et al., 2017; Smith et al., 2013; Xu et al., 2016; Yusa et al., 2015). Ceci est dû au fait que les climats de toutes les régions sont distincts et qu'il existe une variété de raison d'étudier les VC (Guttorp, 2010; Smith et al., 2013). Une période de VC peut donc prendre différentes formes selon l'intention de l'étude : santé publique, agriculture, économie, climatologie, etc. (Lyon & Barnston, 2017; Smith et al., 2013). De plus, puisque les définitions ne sont pas constantes entre les études, il devient assez difficile de faire des comparaisons entre chacune d'entre elles et d'établir des tendances (Clark et al., 2006; Sanderson et al., 2017).

Par contre, lorsqu'on s'intéresse aux définitions de VC utilisées dans les études réalisées ici et ailleurs dans le monde, on remarque que trois paramètres sont pris en considération (Smoyer-Tomic et al., 2003; Xu et al., 2016). Le premier paramètre concerne l'indicateur de température et prend généralement la forme d'une température maximale, minimale ou moyenne. Une définition peut également prendre en compte plus d'un indicateur ou combiner l'effet de la température et l'Humidex (Deo et al., 2007).

Le deuxième paramètre est le seuil, celui-ci peut prendre la forme d'un seuil relatif, tel qu'un centile, ou encore d'un seuil absolu. Le seuil identifié doit représenter une température plus chaude que la normale et pour lequel certains effets indésirables pourraient être observés dans la région d'étude. Malgré tout, les experts sont toujours divisés puisque certains croient en l'utilisation d'un seuil relatif, alors que d'autres sont

plutôt d'avis qu'un seuil fixe est préférable (Perkins & Alexander, 2013; Smith et al., 2013).

Enfin, le dernier paramètre est la durée minimale d'une VC et doit généralement être supérieur à 2 jours. D'autres variables peuvent faire partie de la définition, telles que la vitesse des vents, le rayonnement solaire et la couverture nuageuse, mais ceci est moins commun (Guttorp, 2010; Perkins & Alexander, 2013). Puisqu'il existe une variété de définitions du terme, choisir les variables appropriées ainsi que les bons seuils sont primordial afin de ne pas surestimer ou sous-estimer une période de VC dans la région d'étude (Perkins & Alexander, 2013; Xu et al., 2016).

2.3.1 Définitions canadiennes des vagues de chaleur

Au Canada, plusieurs définitions du phénomène existent et varient généralement en fonction de la région puisque le climat du territoire canadien est très diversifié (Lebel et al., 2017; Santé Canada, 2008, 2011b, 2011a). Plusieurs institutions canadiennes ont tenté de définir les VC, mais en général, les seuils ont été établis à la suite d'une analyse sur la mortalité en période de chaleur extrême puisque les études concernant le phénomène au pays se sont surtout intéressées à la santé humaine. Habituellement, les seuils retenus dans les définitions ont été identifiés comme causant un excès de mortalité 60% supérieur à la normale et prene la forme d'un seuil fixe (INSPQ, n.d.). Voici un tableau présentant les définitions de différentes institutions canadiennes, ainsi que la carte du Canada comprenant les différents critères d'avertissement de chaleur selon la région :

Tableau 1. Définitions de VC selon différentes institutions canadiennes.

Source	Région	Durée minimale	Indicateur de température		
			Tmax ^a	Tmin ^b	Hmax ^c
Martel et al, 2010	Outaouais	3	31°C	16°C	-
Martel et al, 2010	Montréal	3	33°C	20°C	-
Santé Canada, 2011	Ensemble du Canada	3	32°C	-	-
Chebana et al, 2013	Outaouais	3	31°C	18°C	40
Chebana et al, 2013	Montréal	3	33°C	20°C	40
Météo Média, 2018	Ensemble du Québec	3	30°C	-	-
Li et al., 2018	Ensemble du Canada	5	5°C + que la normale	-	-
Atlas Canada, 2019	Ensemble du Canada	3	30°C	-	-
FMEQ, 2019	Ensemble du Québec	3	30°C	-	-
Praries Climate Center, 2019	Ensemble du Canada	3	30°C	-	-
CIUSSS du Centre-Sud-De-l'Ile-De-Montréal, 2019	Montréal	3	33°C	20°C	-
Lebel et al, 2019	Outaouais	3	31°C	18°C	-
Lebel et al, 2019	Montréal	3	33°C	20°C	-
ECCC, 2020	Ontario	2	31°C	20°C	40
ECCC, 2020	Québec	2	30°C	-	40

a. Tmax = Température maximale diurne

b. Tmin = Température minimale nocturne

c. Hmax = facteur Humidex maximal diurne

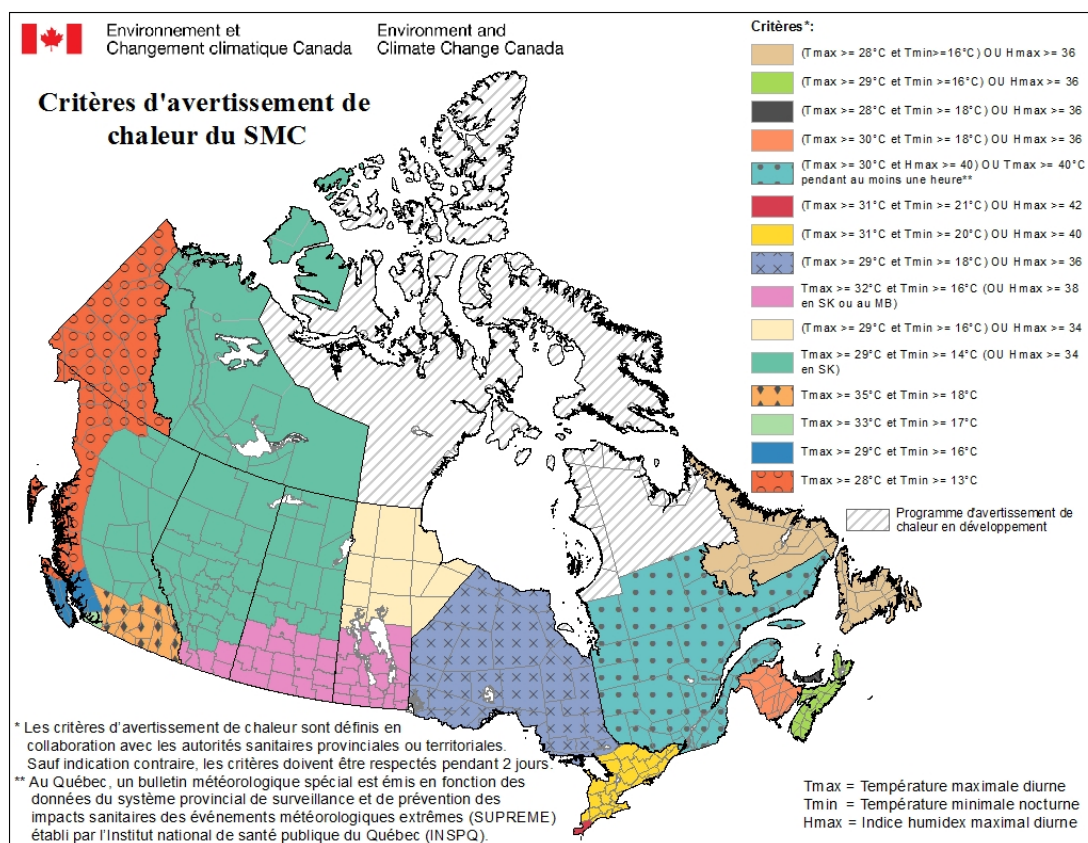


Figure 2. Critères d'avertissement de chaleur pour l'ensemble du Canada (ECCC, 2020).

Les institutions les plus reconnues, telles que ECCC, ont défini un épisode de VC en Ontario comme étant une période où les températures diurnes atteignent ou dépassent 31°C pendant au moins deux jours consécutifs et où les températures nocturnes ne sont pas en dessous de 20°C. De plus, un avis de chaleur sera émis si l'Humidex est supérieur à 40 pendant deux jours consécutifs (ECCC, 2020). Pour sa part, Santé Canada a défini un épisode de VC comme étant une période lors de laquelle les températures maximales atteignent ou dépassent 32°C (basé sur la mesure de 90°F) pendant trois jours ou plus (Santé Canada, 2011b). Enfin selon, Atlas Canada et la FMEQ, une VC survient lorsque la température atteint ou dépasse 30°C pendant au moins 3 jours consécutifs (Atlas climatique du Canada, 2019; FMEQ, 2019; PCC, 2019).

Dans le même ordre d’idée, selon différentes sources dans la littérature québécoise, une canicule¹ est considérée comme une période d’au moins trois jours consécutifs où les températures maximales sont supérieures ou égales à un certain seuil (30°C à 33°C selon les régions), en plus d’avoir des températures minimales nocturnes supérieures à un certain seuil (16°C à 20°C) (Chebana et al., 2013; INSPQ, n.d.; Kaiser et al., 2019; Lebel et al., 2017; Martel et al., 2010; Santé et services sociaux Québec, 2019). Les seuils varient selon la région du Québec étudiée, mais de façon générale, les plus grandes villes, telles que Montréal, ont les seuils les plus hauts (Chebana et al., 2013; Climate data, n.d.; Lebel et al., 2017).

2.4 Caractéristiques physiques de la vague de chaleur

Une période de VC est caractérisée par des températures supérieures aux normales et un taux d’humidité élevé, créant un certain inconfort pour les populations qui les subissent (ECCC, 2020; Santé Canada, 2011a). Dans la majorité des cas, les processus atmosphériques reliés aux VC suivent généralement tous un patron similaire (Meehl & Tebaldi, 2004). Effectivement, dans la région d’étude, une VC se développe lorsqu’un anticyclone se forme au-dessus de l’Atlantique au large des côtes des États-Unis et demeure stationnaire pendant un certain temps comme ce qui est présenté à la figure 3 (Basara et al., 2010). Ceci a comme impact principal de créer une rotation dans le sens de l’horloge ce qui amène l’air chaud et humide provenant du sud dans les latitudes plus hautes (Herring et al., 2019). De plus, durant les périodes de VC on retrouve de façon générale un ciel

¹Au Québec, le terme Canicule est généralement utilisé pour faire référence à une VC.

dégagé et des vents faibles ou inexistantes qui persistent pendant plusieurs jours (Basara et al., 2010; Meehl & Tebaldi, 2004).

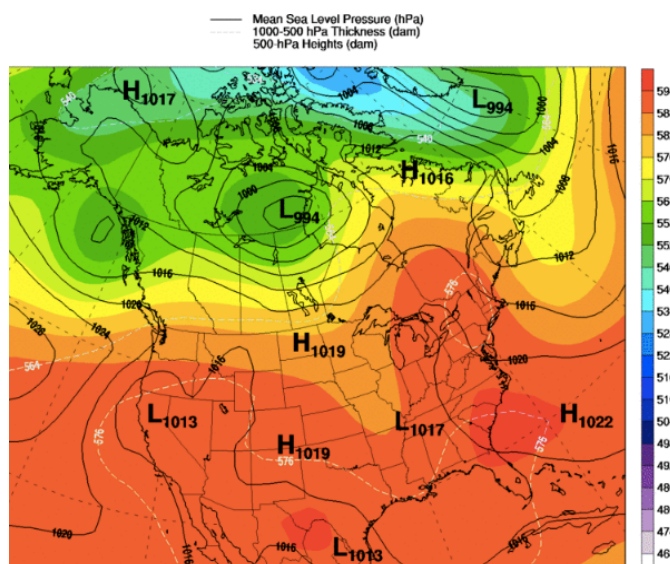


Figure 3. Cartes synoptiques de l'Amérique du Nord, présentant la pression au niveau de la mer (hPa), les cellules de basses et hautes pressions et la hauteur du géopotiel (500 mb) d'une journée chaude survenue 17 juillet 1953 pendant période de VC en Ontario (Centre météorologique de l'UQAM, 2019).

2.5 Historique des vagues de chaleur au Canada

2.5.1 Réchauffement climatique canadien

Au Canada, l'augmentation des températures atmosphériques moyenne est plus drastique puisque le réchauffement du climat est supérieur dans les hautes latitudes (Conseil des académies canadiennes, 2019; ECCC, 2019; Z. Li et al., 2018). Effectivement, depuis le début du 20^e siècle, la température moyenne aurait augmenté de 1.9 °C au sud du Canada comparativement à une augmentation mondiale inférieure à 1 °C par rapport au niveau de l'ère préindustrielle (ECCC, 2019; Field et al., 2014; FMEQ, 2019). En Ontario et au Québec, on remarque une augmentation de 1.3°C et de 1.1°C respectivement de la température moyenne annuelle entre les années 1948 et 2016 (Zhang, X., 2019). Cependant, cette augmentation de température moyenne ne s'est pas faite de façon

constante. Il aurait eu une augmentation durant la première moitié du siècle suivi d'un léger refroidissement jusqu'aux années 1970. Par la suite, les températures auraient augmenté drastiquement jusqu'aux années actuelles (Zhang, X., 2019). De plus, les températures moyennes d'été ont elles aussi augmenté au cours de dernières décennies. En effet, les températures estivales moyennes auraient augmenté de 1.1°C en Ontario et de 1.5°C au Québec depuis 1948 (Zhang, X., 2019).

Au niveau des extrêmes chauds, la température maximale quotidienne la plus élevée aurait augmenté de 0.6°C depuis le milieu du 20^e siècle (Zhang, X., 2019). De plus, comme présenté dans la figure 4, les journées chaudes annuelles, avec température maximale égale ou supérieure à 30°C, auraient augmenté de 1 à 3 jours depuis 1948 dans différentes régions du sud du Canada. Enfin, le nombre de nuits chaudes, avec température minimale supérieure à 22°C, aurait significativement augmenté au sud de l'Ontario et du Québec depuis le milieu du siècle (Zhang, X., 2019).

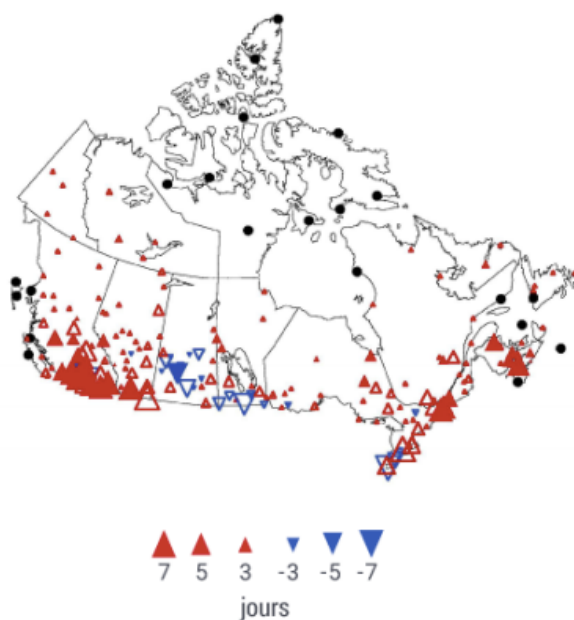


Figure 4. Changements observés dans le nombre annuel de journées chaudes (lorsque la température maximale quotidienne est supérieure à 30 °C). Les changements sont calculés selon les tendances linéaires lors de la période de 1948 à 2016. Les triangles solides indiquent des tendances d'importance significative à un niveau de 5%.

2.5.2 *Événements de chaleur extrême*

Au sud du Canada, les événements de chaleur extrême se produisent régulièrement, il est donc normal de faire face à un ou quelques-uns de ces événements chaque année. Dans la région à l'étude, ce phénomène survient durant les mois les plus chauds d'été, soit de mai à septembre, et est généralement causé par les masses d'air chaud et humide qui proviennent du golfe du Mexique ainsi que du sud des États-Unis (ECCC, 2018a). Depuis le début des enregistrements climatiques dans la région, certains événements demeurent très marquants.

Premièrement, l'année 1921 a été très chaude au sud-est du Canada. Effectivement, le mois de juillet 1921 détient encore aujourd'hui le record du mois de juillet le plus chaud jamais enregistré dans le sud-est du pays. Lors de cette saison estivale particulièrement extrême, de nombreuses VC se seraient produites, alors que plusieurs nuits tropicales auraient été observées (Raymond, 2020). Quelques années plus tard, soit pendant les années 30, l'ensemble de l'Amérique du Nord plonge dans une période très chaude et sec nommée le « Dust Bowl » (McLeman, 2006). À cette époque, plusieurs VC intenses sont recensées un peu partout sur le continent, mais en 1936, l'Ontario expérimente une VC historique qui aurait été accompagnée de grandes sécheresses et qui aurait causé la mort de plus de 700 Canadiens (McLeman, 2006; Philips, 2013; Smoyer-Tomic et al., 2003). Pendant les années 50 et 60, de nombreux records de chaleur sont enregistrés. En 1953 et 1955, en Ontario et au Québec, des VC particulièrement marquantes ont également été reportées (Philips, 2013). Après cette période de chaleur, une période un peu plus froide que la normale s'est fait ressentir au pays au cours des années 1970 jusqu'aux années 1980 et peu de VC importantes se sont produites (ECCC, 1999).

Au cours des années 1990, on dénombre à nouveau une augmentation des VC au pays. En effet, des VC assez intenses auraient touché la région d'étude et auraient encore une fois causé une augmentation du taux de mortalité (Kaiser et al., 2019). Lors de l'année 1999, on observe des VC dans tout le pays (Roy et al., 2010), mais les villes principales de l'Ontario et du Québec expérimentent le double de journée chaude que la normale (supérieure à 30°C) (Smoyer-Tomic et al., 2003). Or, depuis la fin des années 1990 soit au même moment où les VC semblent devenir plus fréquentes, les provinces canadiennes ont fait des efforts constants pour limiter leurs impacts sur la population. Pour ce faire, des moyens de surveillance et des plans de réponse ont été développés afin de réduire au maximum les impacts (Climate data, n.d.; Roy et al., 2010).

Enfin, depuis le début du 21^e siècle, les VC semblent plus intenses. Par exemple, en juillet 2010, des VC ont envahi l'ensemble du Québec et de l'Ontario, ce qui aurait entraîné une augmentation de 33% du taux de mortalité (Bustinza et al., 2013; Kaiser et al., 2019; Lebel et al., 2017). Selon le CIUSSS du Centre-Sud-de-l'île-de-Montréal, plus de 100 personnes seraient décédées à la suite de cette VC seulement sur l'île de Montréal (Kaiser et al., 2019; Roy et al., 2010). De plus, il y aurait eu 3400 hospitalisations supplémentaires (INSPQ, n.d.; Roy et al., 2010).

Lors de l'été 2018, des VC encore plus intenses que ceux de 2010 se sont produites et celles-ci auraient eu des répercussions significatives pour la population, notamment en augmentant le taux de décès (FMEQ, 2019; Kaiser et al., 2019; PCC, 2019). Effectivement, du 30 juin au 5 juillet 2018, un épisode de chaleur extrême aurait envahi la région du Québec, ce qui aurait causé la mort de plus de 80 personnes, donc 66 seraient décédés sur l'île de Montréal (Climate data, n.d.; Kaiser et al., 2019; PCC, 2019). Selon, le CIUSSS, le

mois de juillet 2018 a été le plus chauds enregistrés depuis près d'un siècle dans le sud du Québec (Kaiser et al., 2019; Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018b). Le mois d'août 2018 aurait lui aussi été excessivement chaud et jamais le sud de la province n'avait connu deux mois consécutifs aussi chauds (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018a). Ceci a causé des sécheresses ainsi que des dommages importants à l'agriculture locale dans différentes régions du Québec (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018c). Bref, l'été de 2018, est considéré comme l'été le plus chaud observé dans la région du Québec depuis les 146 dernières années, par contre grâce aux mesures mises en place par le gouvernement les impacts pour la santé de même que le nombre de décès étaient plus bas que lors de l'épisode de 2010 (Climate data, n.d.; Lebel et al., 2019; Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018b). Enfin, très récemment soit lors de l'été 2020, la région d'Ottawa a été envahie par plusieurs VC très intenses dès le mois de mai et pour la majorité du mois de juillet. Selon, David Philips un climatologue senior d'ECCC, le mois de juillet 2020 a été le plus chaud enregistré depuis près de 100 ans au Canada, mais l'été incroyablement chaud de 1921 dans la région détient toujours le record (Raymond, 2020).

Au Canada, ces VC pourraient être amplifiées davantage dans les années futures. En effet, selon l'Institut national de santé publique du Québec, les CC vont causer une hausse très probable de la fréquence et de la durée des VC dans plusieurs villes canadiennes, alors que le nombre de journées chaudes (30°C et plus) pourrait doubler voire tripler d'ici la fin du siècle (INSPQ, n.d.). Malgré que les VC ne soient pas aussi extrêmes que dans certains autres pays plus au sud, la population canadienne est tout de même à

risque et devrait en être préoccupée puisqu'elle va elle aussi être touchée par cette augmentation d'intensité des événements (FMEQ, 2019; Z. Li et al., 2018). Selon le gouvernement du Canada, avec la hausse des CC on devrait s'attendre à une augmentation de la fréquence des jours de chaleur accablante au cours des 30 prochaines années (ECCC, 2019; FMEQ, 2019; Kaiser et al., 2019; Ouranos, 2020; Santé Canada, 2011a). De plus, selon la FMEQ, les VC pourraient créer une augmentation entre 0.5% et 3,5% du nombre de décès d'ici à la fin du siècle (ECCC, 2019; FMEQ, 2019).

2.6 Les températures ressenties en période de vagues de chaleur

L'impact des températures ressenties sur les populations en période de VC est très grand (Deo et al., 2007; Dunne et al., 2013; D. Li et al., 2020). Les températures ressenties peuvent être mesurées de différentes façons, mais dans la majorité des cas, elles sont le résultat de deux variables, soit la température et l'humidité (ECCC, 2018a; Santé Canada, 2011a; Smoyer-Tomic et al., 2003). Les températures ressenties sont souvent la mesure utilisée par les autorités pour déclarer une situation dangereuse pour la population puisqu'elles sont reliées à un taux de mortalité plus élevé (Dahl et al., 2019; Deo et al., 2007).

Le facteur Humidex est une des mesures les plus reconnues au Canada pour analyser la température ressentie par le corps en humain en période de chaleur de façon adéquate (Chebana et al., 2013; Dahl et al., 2019; Delworth et al., 1999; ECCC, 2019; Smoyer et al., 2000). Cette mesure a été introduite au Canada en 1965 et depuis ce moment, elle a été largement utilisée pour analyser les données climatiques de nombreuses études au pays et ailleurs dans le monde (Brooke Anderson et al., 2013; Chebana et al., 2013; ECCC, 2019). Pour l'être humain, un Humidex élevé crée un inconfort, puisque les

températures trop élevées font en sorte que le corps n'est pas en mesure de transpirer et donc de réduire convenablement sa température corporelle (ECCC, 2018a; D. Li et al., 2020). Des températures ressenties élevées seraient la cause principale du taux de mortalité élevé recensé lors des importantes VC survenue au cours des dernières décennies, entre autres celle de 1995 à Chicago et celle de 2003 en Europe (Russo et al., 2017).

Le facteur Humidex est calculé en combinant la température ambiante en °C et l'humidité contenue dans l'air. Ce dernier se mesure grâce au thermomètre mouillé qui nous indique le point de rosée en °C. Par exemple, si la température extérieure est de 32°C et que le point de rosée est de 21°C (l'air contient 65% d'humidité), l'Humidex se situe donc à 40. De plus, il faut préciser que le facteur Humidex est seulement mesuré lorsque la température enregistrée est égale ou supérieure à 20°C (ECCC, 2021). Selon ECCC, un Humidex qui se situe entre 35 et 39 créerait beaucoup d'inconfort et les activités extérieures devraient être réduites ou du moins adaptées. Si l'Humidex dépasse 40, il est considéré comme extrême et il devient dangereux d'y exercer des activités extérieures (tableau 2) (ECCC, 2018a).

Tableau 2. Humidex (H) et niveau d'inconfort ressenti (ECCC, 2018a).

Humidex	Niveau d'inconfort ressenti*
20 < H < 29	Un peu d'inconfort
30 < H < 39	Un certain inconfort
40 < H < 45	Beaucoup d'inconfort
46 < H	Dangereux

* Le niveau de confort ou d'inconfort humain est déterminé par la température ambiante ainsi que l'humidité. À cela, s'ajoute la capacité de chaque individu à contrôler sa chaleur corporelle (Oleson et al., 2015).

Dans certaines régions du globe, on remarque que l'humidité dans l'air est à la hausse depuis quelques décennies, or ceci peut augmenter substantiellement les températures ressenties en période de VC (Basara et al., 2010; Dahl et al., 2019; Delworth et al., 1999; FMEQ, 2019). Ces changements récents au niveau de l'Humidex seraient largement reliés

à l'augmentation des températures de surface et des précipitations dans certaines régions (Basara et al., 2010; Dahl et al., 2019; FMEQ, 2019). On croit donc qu'avec les CC, la fréquence des journées accablantes (avec facteur Humidex élevé) devrait doubler d'ici le milieu du siècle. Or, cela va faire en sorte qu'un nombre plus élevé de personnes sera touché par les journées très chaudes affectant donc leur santé (Coffel et al., 2018; Dahl et al., 2019; Davis et al., 2003). Également, des modèles climatiques suggèrent qu'au cours du prochain siècle plusieurs régions du monde expérimenteront des températures ressenties amplifiées en période de VC (Russo et al., 2017).

2.7 Impacts des vagues de chaleur

Il est important d'étudier les périodes de VC puisque celles-ci ont des répercussions importantes non seulement sur la santé, mais également sur l'économie, l'agriculture et les ressources d'eau potable ainsi que sur la sécurité publique (ECCC, 2019; FMEQ, 2019; D. Li et al., 2020; Santé Canada, 2008, 2011b). D'abord, les événements de chaleur ont des impacts directs sur les populations et Santé Canada identifie les VC comme un enjeu de santé publique (FMEQ, 2019; Santé Canada, 2008). Les répercussions des VC sur la santé des Canadiens dépendent de plusieurs facteurs, par exemple l'âge et l'état physique des personnes touchées ou encore du niveau d'effort physique pratiqué lors des événements de la sorte (Kaiser et al., 2019; Santé Canada, 2011b).

Tout le monde peut être vulnérable aux impacts de santé liée à la chaleur, cependant les risques pour les personnes vulnérables² sont encore plus grands (Basara et al., 2010;

² Les personnes âgées, les personnes vivant seules, les nourrissons, les jeunes enfants, les femmes enceintes, les personnes souffrant de maladies chroniques ou de santé mentale, les travailleurs extérieurs estivaux, les personnes qui font de l'exercice à la chaleur, les personnes qui se trouvent dans une situation

Chien et al., 2016; Dahl et al., 2019; Davis et al., 2003; ECCC, 2019; FMEQ, 2019; Harlan et al., 2013; Kaiser et al., 2019; Oudin Åström et al., 2011; PCC, 2019; Roy et al., 2010; Santé Canada, 2008, 2011b). Dans la majorité des cas, les effets sur la santé des VC ne sont pas dramatiques, mais ils peuvent aller jusqu'à causer la mort et augmenter les hospitalisations (Chien et al., 2016; Davis et al., 2003; FMEQ, 2019; Kaiser et al., 2019; Lebel et al., 2017; Santé Canada, 2011b; Smoyer-Tomic et al., 2003; Smoyer et al., 2000; Yusa et al., 2015). Au Canada, les VC sont considérées comme étant l'un des événements extrêmes responsables d'un plus grand nombre de décès comparativement aux autres facteurs extrêmes météorologiques (FMEQ, 2019; Santé Canada, 2011b; Smoyer et al., 2000). Comme présenté dans la figure 5, on remarque que dès que la température moyenne est supérieure à 20°C, le pourcentage de mortalité relative est drastiquement à la hausse (Santé Canada, 2011b).

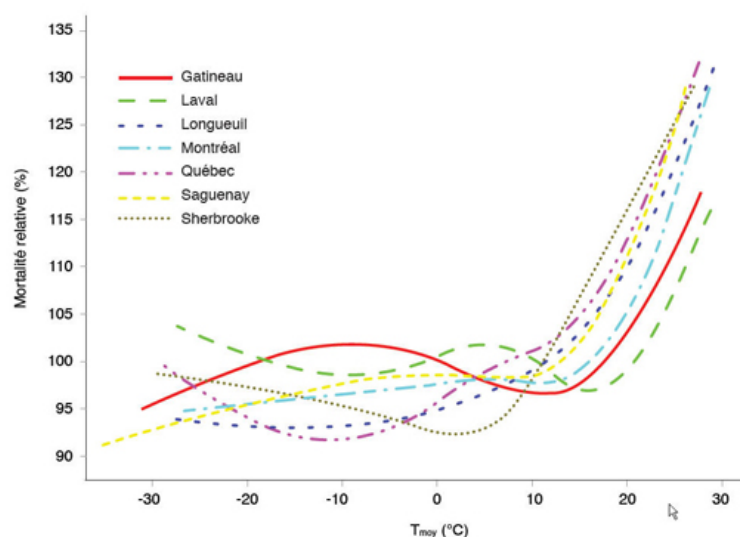


Figure 5. Relation entre la température et la mortalité de 7 villes canadiennes (Gatineau, Laval, Longueuil, Montréal, Québec, Saguenay et Sherbrooke) (Santé Canada, 2011b).

d'isolement social, les sans-abri, les Autochtones, les groupes minoritaires, les gens avec un statut économique plus faible (par une diminution d'accessibilité à la climatisation) ainsi que les gens qui vivent dans une région à risque d'ICU (peu d'espace vert).

De plus, les VC ont des répercussions néfastes sur l'économie régionale. Selon des recherches effectuées par le groupe Ouranos, le coût fiscal de la hausse des VC et l'intensification des allergies de pollens devrait être très important au cours des prochaines années (Ouranos, 2020). En effet, on croit que cela pourrait coûter entre 500 millions et 1 milliard de dollars d'ici 2075. Le déploiement d'un plan d'urgence pour ce genre de situation peut coûter environ 3 millions de dollars sans oublier les coûts supplémentaires importants pour le système de santé des provinces. Pour le Canada, ce montant est évidemment plus élevé et les coûts associés aux VC pourraient se chiffrer à environ 1,6 milliard d'ici le milieu du siècle (FMEQ, 2019).

La hausse des températures et des VC a également comme impact de créer des sécheresses plus récurrentes au Canada (ECCC, 2019), or celles-ci peuvent avoir des dommages significatifs les ressources d'eau potable, sur l'agriculture locale et sur les feux de forêts (FMEQ, 2019; PCC, 2019; Yusa et al., 2015; Zhang, X., 2019). En effet, les périodes de grande chaleur peuvent créer des déficits d'eau importants, ce qui peut causer un ralentissement du système agricole et également augmenter la fréquence des feux de forêts au pays. Bien que la majorité des sécheresses au Canada se produisent dans les prairies, des sécheresses touchent également le sud de l'Ontario et du Québec (ECCC, 2019; FMEQ, 2019; Yusa et al., 2015).

Enfin, les VC peuvent avoir des répercussions sur la sécurité publique, puisqu'il a été possible d'observer que lorsque des températures élevées sont ressenties, le taux de criminalité est supérieur (Smoyer-Tomic et al., 2003). Certaines études ont permis de démontrer que les températures élevées rendent certains individus plus agressifs, impatients et plus compulsifs (C. A. Anderson, 2001; PCC, 2019).

2.8 L'effet de l'îlot de chaleur urbain

L'effet de l'ICU amplifie grandement les risques liés aux VC (FMEQ, 2019; Harlan et al., 2013; Santé Canada, 2011b). Dans les environnements urbains, les périodes de chaleur sont amplifiées par les conditions atmosphériques locales (Basara et al., 2010; CCES, n.d.; Fischer & Schär, 2010a; Oleson et al., 2015; Santé Canada, 2011b). Dans ces zones, on y retrouve habituellement une forte densité de population, une concentration élevée de bâtiments, peu d'espace vert, une charge thermique accrue et beaucoup de circulation (Harlan et al., 2013). Or, les infrastructures bâties ont une capacité de conservation de la chaleur plus élevée et sont sujettes à un plus grand réchauffement que les surfaces naturelles (CCES, n.d.; Harlan et al., 2013; Santé Canada, 2011b). Par exemple, les routes, l'asphalte ou les édifices emmagasinent beaucoup de chaleur et se réchauffent plus facilement que les surfaces naturelles puisqu'ils ont un albédo faible (Basara et al., 2010; CCES, n.d.; FMEQ, 2019; Oleson et al., 2015; Santé Canada, 2011b).

Dans les zones urbaines, le corps humain a souvent l'impression que les températures ressenties sont plus élevées. Effectivement, l'humidex est souvent plus élevé en ville dû aux vents moins importants, au manque d'évapotranspiration et aux températures chaudes qui conservent davantage de vapeur d'eau (Basara et al., 2010; Oleson et al., 2015). De plus, dans les grandes villes, on retrouve un flux d'énergie anthropogénique important puisqu'il y a beaucoup de circulation, une grande densité de population et des activités qui dégagent beaucoup de chaleur (trafic dense, usine, etc.). Sans oublier qu'en période de VC, on utilise davantage les systèmes d'air climatisé, ce qui relâche encore une fois plus de chaleur dans l'air environnant (FMEQ, 2019; Santé Canada, 2011b). Le tout augmente la formation de nuages et des gaz à effet de serre, ce qui mène à une plus grande capture des

radiations longues et ne fait qu'augmenter la température dans ces régions (Basara et al., 2010; Oleson et al., 2015; Smoyer et al., 2000). Par exemple, selon l'étude de la FMEQ, en période de VC les températures expérimentées sur l'île de Montréal sont près de 5°C plus élevées que les régions adjacentes. Selon cette même source, les ICU peuvent se produire dans plusieurs villes plus densément peuplées du Québec, et pas seulement dans les métropoles (FMEQ, 2019; Santé Canada, 2011b).

Enfin, le plus grand problème avec les zones urbanisées, c'est le fait que même lorsque la nuit tombe, la température reste relativement élevée comparativement aux zones rurales (voir figure 6) (CCES, n.d.; Oleson et al., 2015; PCC, 2019; Santé Canada, 2011b; Smoyer et al., 2000; Snider, 2016). On remarque donc que le stress thermique vécu dans les grandes villes est plus élevé et beaucoup plus perceptible pendant la nuit (Fischer & Schär, 2010a; Harlan et al., 2013; Oleson et al., 2015; PCC, 2019; Santé Canada, 2011b). La population sans d'air climatisé n'a donc aucun moins de faire redescendre sa température corporelle ce qui peut créer davantage de décès. Or, c'est souvent dans les zones urbaines qu'on retrouve des bâtiments plus vieux non équipés d'air climatisé, qu'on retrouve un nombre important de personnes âgées ainsi qu'une population à faible revenu (Basara et al., 2010; Harlan et al., 2013; PCC, 2019).

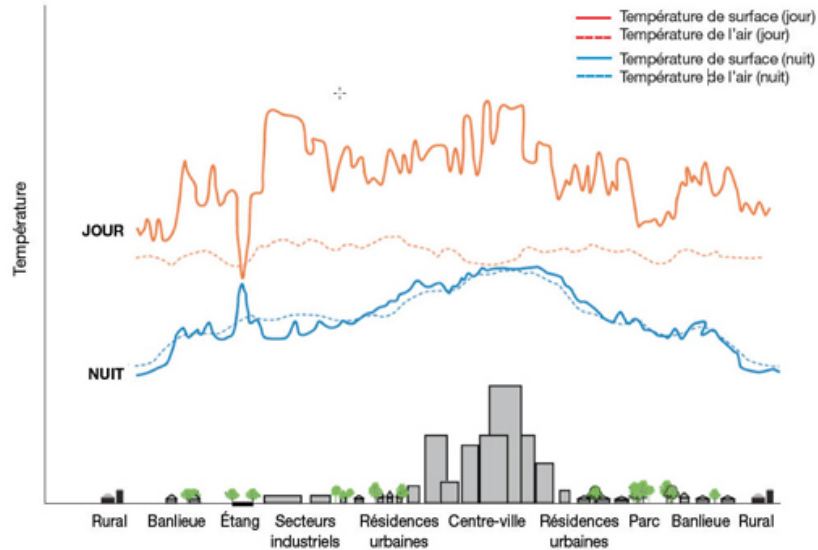


Figure 6. Relation entre la température et l'ICU entre la nuit et le jour (Santé Canada, 2011b).

Il est très important d'étudier la réaction des zones urbaines aux VC puisque dans les années à venir une part encore plus importante de la population habitera dans ces zones et les CC risquent d'amplifier les extrêmes de températures (Fischer & Schär, 2010a; Harlan et al., 2013; Kaiser et al., 2019; Oleson et al., 2015; Smoyer et al., 2000). De plus, bien que l'effet de l'ICU soit bien documenté, peu d'études se penchent sur l'effet de l'ICU durant les événements extrêmes de VC, alors qu'il existerait une large différence dans l'intensité des VC expérimentées entre les zones rurales et urbaines (Basara et al., 2010; Fischer et al., 2012; Harlan et al., 2013).

Chapitre 3 Méthodologie détaillée

3.1 Sélection des sites d'étude

Les villes d'Ottawa, de Montréal ainsi que de Toronto, situées au sud-est de l'Ontario et du Québec, ont été sélectionnées comme sites d'étude puisqu'on y retrouve des températures estivales élevées par rapport au reste du Canada en plus d'y retrouver un taux d'humidité important (Santé Canada, 2011b, 2011a). En effet, ces villes sont situées dans une zone climatique continentale tempérée où les hivers plutôt froids sont suivis d'une période estivale humide et chaude alimentée par les cellules d'air provenant de l'océan Atlantique et du golfe du Mexique (Baldwin et al., 2000; ECCC, 2019; Z. Li et al., 2018; Smoyer-Tomic et al., 2003; Smoyer et al., 2000). De plus, Santé Canada identifie les régions entourant la vallée de la rivière du Saint-Laurent couvrant autant le Québec que l'Ontario comme les régions les plus susceptibles de faire face à des VC au pays (Santé Canada, 2011a; Smoyer-Tomic et al., 2003). Ces sites ont également été choisis, car ils représentent des centres importants de population au sud du Canada et à ces endroits l'effet d'ICU est perceptible.

3.2 Description des sites d'études

3.2.1 Ottawa

Notre premier site d'étude, la ville d'Ottawa, se situe aux abords de la rivière des Outaouais au sud-est de la province de l'Ontario. En 2016, on comptait une population de 934 243 habitants dans la capitale, représentant donc une des quatre villes canadiennes les plus peuplées (Statistique Canada, 2016b). Le centre-ville se situe à 45° 41' de latitude

nord et à $-75^{\circ} 70'$ de longitude ouest. Dans la région, la température moyenne, basée sur les normales climatiques de 1981 à 2010, est de $6,4^{\circ}\text{C}$. Le mois de juillet est généralement le mois le plus chaud de l'année avec une température moyenne de $21,0^{\circ}\text{C}$, tandis que janvier est le mois le plus froid avec une température de $-10,3^{\circ}\text{C}$. Les précipitations annuelles moyennes sont de $943,4\text{ mm}$ (ECCC, 2018b). La topographie de la région est relativement plane avec quelques reliefs et la région a une élévation approximative de 70 m d'altitude. Enfin, la région d'Ottawa se trouve dans une zone végétale de forêt décidue. Dans le centre-ville de la capitale, il y a peu de végétation, mais aux alentours du noyau urbain on y retrouve la *Ceinture de Verdure* ainsi que la rivière des Outaouais (CCN, n.d.; Ressources naturelles et Faune Québec, 2006).

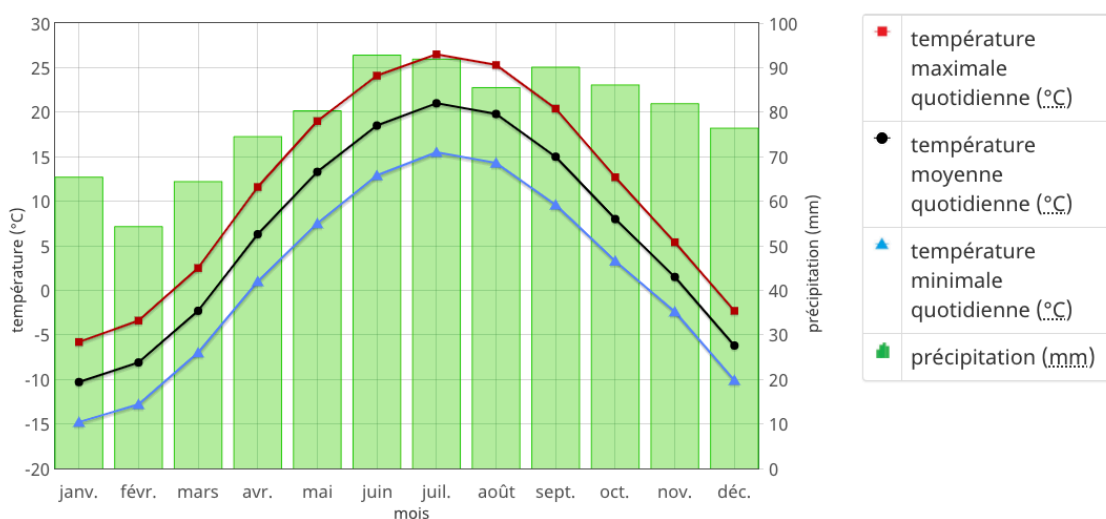


Figure 7. Températures et précipitations pour les normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 pour Ottawa Macdonald-Cartier Int'l A (ECCC, 2018).

3.2.2 Montréal

Notre deuxième site d'étude est Montréal, soit la ville la plus densément peuplée de la province québécoise avec un nombre d'habitants de $1\ 704\ 694$ (Statistique Canada, 2016b). Le centre-ville localisé au sud de la province québécoise se trouve à environ 165 kilomètres à l'est d'Ottawa. Son centre-ville se situe à $45^{\circ} 51'$ de latitude nord et à -73°

68' de longitude ouest. La région montréalaise a également un climat de type tempéré, avec des étés plutôt chauds et des hivers froids. La température moyenne annuelle dans cette région, basée sur les normales climatiques de 1981 à 2010, est de 6,8°C et les précipitations assez élevées totalisent 1000,3 mm par année en moyenne. Le mois de juillet est généralement le mois le plus chaud de l'année avec une température moyenne de 21,2°C, tandis que janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de -9.7°C (ECCC, 2018b). Tout comme Ottawa, au centre-ville de Montréal il y a peu de verdure, malgré le fait que depuis plusieurs années il y a des efforts de verdissement du milieu urbain (Caron et al., 2007). L'île de Montréal est également entourée par le fleuve Saint-Laurent.

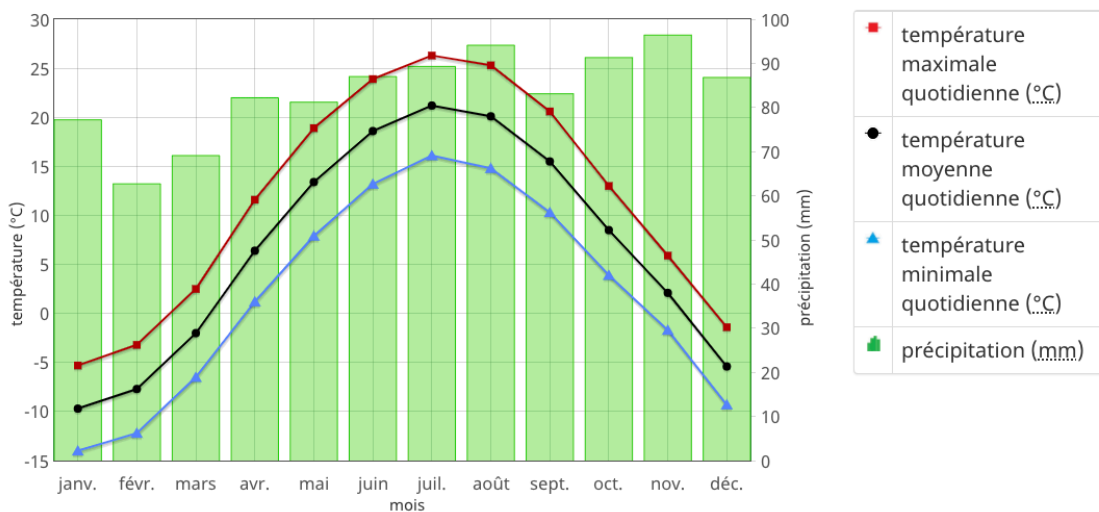


Figure 8. Températures et précipitations pour les normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 pour Montréal Pierre Elliott Trudeau Int'l A (ECCC, 2018).

3.2.3 Toronto

Notre troisième site d'étude, Toronto, compte pour sa part 2 731 571 habitants, ce qui en fait donc la ville la plus peuplée du Canada (ECCC, 2018b). Elle est située sur la rive nord-ouest du Lac Ontario au sud-est de la province de l'Ontario. Le centre-ville se situe à 45° 42' de latitude nord et à -79° 24' de longitude ouest. Selon les normales

climatiques de 1981 à 2010, la température moyenne est de 8.2°C. Le mois de juillet est généralement le mois le plus chaud de l'année avec une température moyenne de 21.5°C, tandis que janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de -5.5°C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 785,9 mm et les mois d'avril à septembre sont les plus humides puisqu'on recense des précipitations abondantes (ECCC, 2018b). La topographie de la région est relativement plane avec quelques ondulations. La région a une élévation de 76 m d'altitude. Au niveau de la végétation, la ville de Toronto est très urbanisée, on y retrouve donc peu de grands espaces verts et le noyau de la ville est entouré de banlieues. Il faut alors sortir suffisamment de la ville pour y retrouver la forêt décidue de la vallée du Saint-Laurent. Enfin, il est important de mentionner que le climat de cette ville est influencé par les Grands Lacs, qui sont situés à proximité.

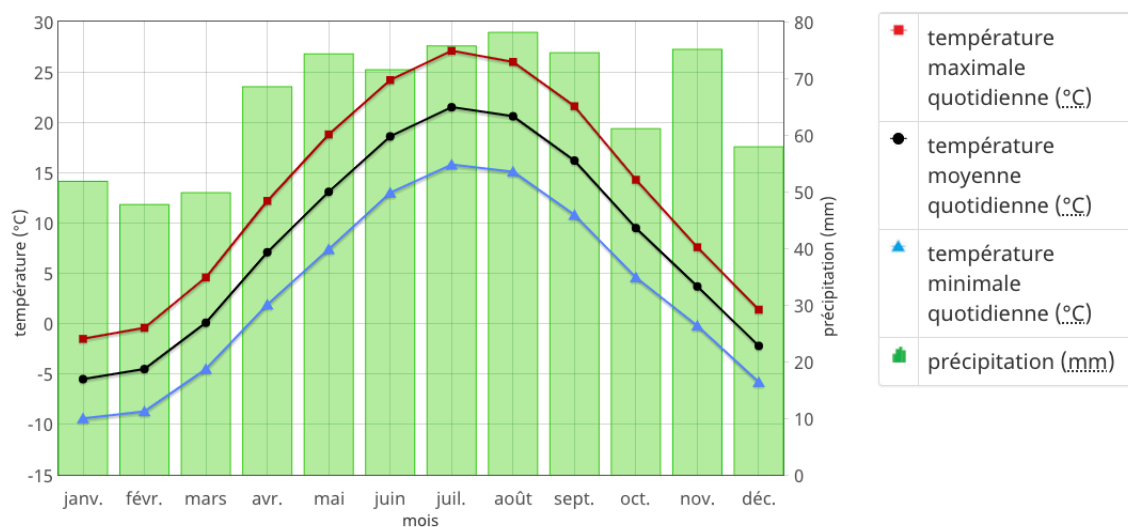


Figure 9. Températures et précipitations pour les normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 pour Toronto Lester B. Pearson Int'l A (ECCC, 2018).

Enfin, afin de réaliser les analyses concernant l'ICU aux sites d'étude sélectionnés, nous avons également choisi des stations situées dans les régions rurales à proximité de ces centres urbains. Pour l'analyse d'Ottawa, la région urbaine compte plusieurs municipalités

rurales à ces alentours, mais nous avons choisi la station de Chelsea vu sa proximité, sa densité faible et sa période d'enregistrement longue. Pour l'analyse de Montréal, la station d'Oka a été sélectionnée puisqu'elle a une densité faible comparativement au centre urbain, une période d'enregistrement longue et des mesures de température horaire. Pour terminer, aucune analyse rurale ne sera réalisée pour Toronto puisqu'on ne retrouve pas de région rurale suffisamment à proximité.

3.3 Récolte de données

La récolte de données historiques sur le climat a été réalisée entièrement en ligne grâce aux portails web *Données climatiques historiques* d'ECCC ainsi que *Données climatiques Canada*. Des critères de sélection ont été établis afin de conserver uniquement les stations pertinentes à la recherche puisque ces plateformes en ligne permettent le téléchargement de données climatiques historiques de centaines de stations météorologiques localisées au pays.

Le premier critère de sélection fut la localisation, seules les stations se trouvant dans la zone d'étude, autant dans les milieux ruraux qu'urbains, ont donc été retenues. Le second critère de sélection fut la période d'enregistrement, seules les stations avec une durée d'enregistrement supérieure à 30 ans ont été conservées étant donné que ceci est la période minimale pour une analyse de la normale climatique d'une région (OMM, 2017). De plus, puisque les VC sont un phénomène très variable, il est important d'étudier la plus longue période d'enregistrement possible, idéalement plusieurs décennies, afin de limiter l'impact de la variabilité sur nos résultats (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). De ce fait, lorsque cela fut possible, des données remontant jusqu'au début du 20^e ont été récoltées. Le troisième critère de sélection fut la fréquence de collecte des données, car pour les

besoins de l'étude des données climatiques quotidiennes ainsi qu'horaires sont nécessaires pour étudier les VC. Enfin, le dernier critère de sélection fut la constance, et donc les stations avec un manque de données supérieure à 20% n'ont pas été retenues (OMM, 2017).

Voici les stations situées dans nos sites d'étude qui respectaient mieux les critères et qui allaient nous permettre de réaliser les objectifs préalablement établis :

Tableau 3. Stations à l'étude.

Site d'étude	Milieu	Nom de la station	Période d'enregistrement	Numéro d'identification	Latitude	Longitude
Site A – Ottawa-Gatineau	Urbain	Ottawa CDA	1889-2020	6105978	45.38333333	-75.71666667
		Ottawa Macdonald Cartier Intl A	1938-2020	6106000	45.3225	-75.66916667
	Rural	Chelsea	1927-2020	7031360	45.51666667	-75.78333333
Site B – Montréal	Urbain	Montréal Pierre Elliott Trudeau Intl A	1941-2020	7025250	45.46666667	-73.74166667
	Rural	Oka	1937-2020	7015730	45.5	-74.06666667
Site C - Toronto	Urbain	Toronto Lester B Pearson Intl A	1937-2013	6158733	43.6772222	-79.630556
		Toronto Intl A	2013-2020	6158731	43.6766667	-79.630556

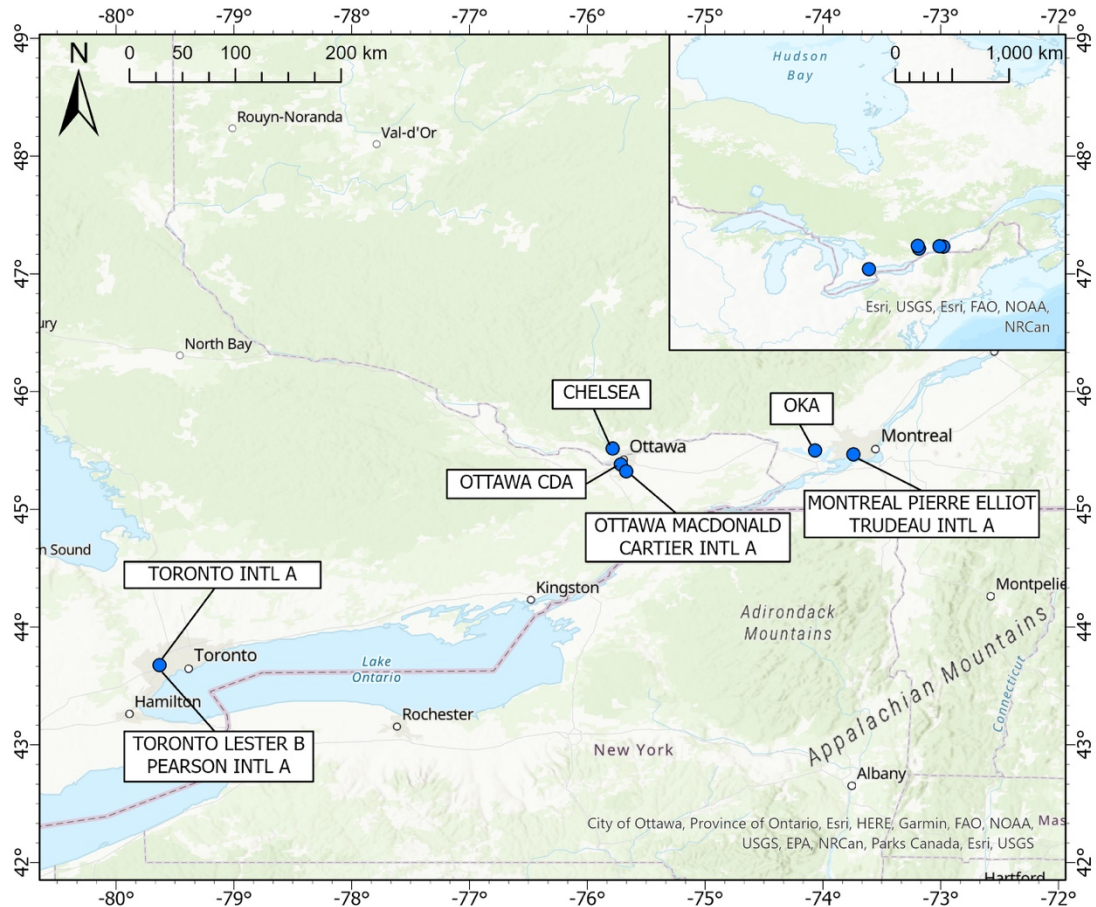


Figure 10. Stations à l'étude.

3.4 Analyses

3.4.1 Analyse du climat régional

Avant de débuter les analyses des VC, l'évolution du climat estival dans les régions préalablement sélectionnées a été étudiée, afin d'établir certaines tendances climatiques pour chacune des régions (OMM, 2017). Les moyennes mensuelles pour la température minimale, moyenne et maximale ont été calculées, de même que les extrêmes maximaux et minimaux mensuels. Les précipitations moyennes ont également été analysées.

3.4.2 Analyse des vagues de chaleur

Après avoir analysé le climat des stations sélectionnées, les VC qui se sont produites depuis le 20^e siècle ont été étudiées selon une gamme de seuils. Tel que discuté dans le chapitre 2, une VC peut être définie comme une période lors de laquelle les températures enregistrées ont dépassé un certain seuil anormalement chaud pour la région, et ce pour plusieurs journées consécutives. Par contre, le seuil établi et le nombre minimal de journées consécutives dépendent de l'objectif de l'étude ainsi que de la région étudiée (Perkins & Alexander, 2013). Puisque les définitions et les seuils actuellement présentés par les institutions canadiennes varient énormément de région en région et dépendent de nombreux facteurs, dans le cadre de notre étude, une définition de VC comprenant différents seuils a été priorisée (Chebana et al., 2013). La définition sélectionnée mentionne qu'une VC survient lorsque la température maximale atteint ou dépasse le seuil pendant au moins trois jours consécutifs et les seuils compris entre 30°C et 33°C ont été étudiés. Cette définition a été choisie suite à une revue des définitions établies par les autorités nationales et provinciales canadiennes disponibles dans la littérature scientifique (Perkins & Alexander, 2013). Ces seuils ont été sélectionnés puisque ce sont des seuils pour lesquels les populations affectées vont ressentir des effets néfastes si ces conditions surviennent pour plusieurs heures ou journées consécutives (ECCC, 2019; FMEQ, 2019; D. Li et al., 2020; Santé Canada, 2008, 2011b). Cette approche nous permet d'observer les tendances selon une variété de seuils, ce qui peut renforcer et vérifier la robustesse des résultats obtenus. Ceci nous permet également de démontrer si le seuil joue un rôle au niveau des conclusions obtenues des tendances des VC.

De plus, une méthode de mesures multiples des VC a été utilisée. Voici les composantes des VC qui ont été analysées pour l'ensemble des seuils préétablis (G. B. Anderson & Bell, 2011; Oleson et al., 2015) :

- La fréquence annuelle des vagues de chaleur (FVC) : le nombre d'événements recensé au cours d'une année;
- La durée de la plus longue vague de chaleur de l'année (DVC) : le nombre maximal de jours consécutifs lors desquels les températures ont dépassé le seuil [en jour];
- L'intensité maximale de la vague de chaleur la plus extrême de l'année (IVC) : la différence entre la température maximale atteinte au cours de la vague de chaleur et le seuil établi [en °C];
- La somme des journées annuelles contribuant aux vagues de chaleur (SVC) : la somme de la durée en jour de toutes les vagues de chaleur survenues pendant l'année [en jour];
- La somme des journées chaudes annuelles (SJC) : le nombre de journées annuel dépassant le seuil [en jour];
- La précocité de la vague de chaleur (PVC) : la date du premier événement survenu en début de saison [en jours depuis le premier mai].

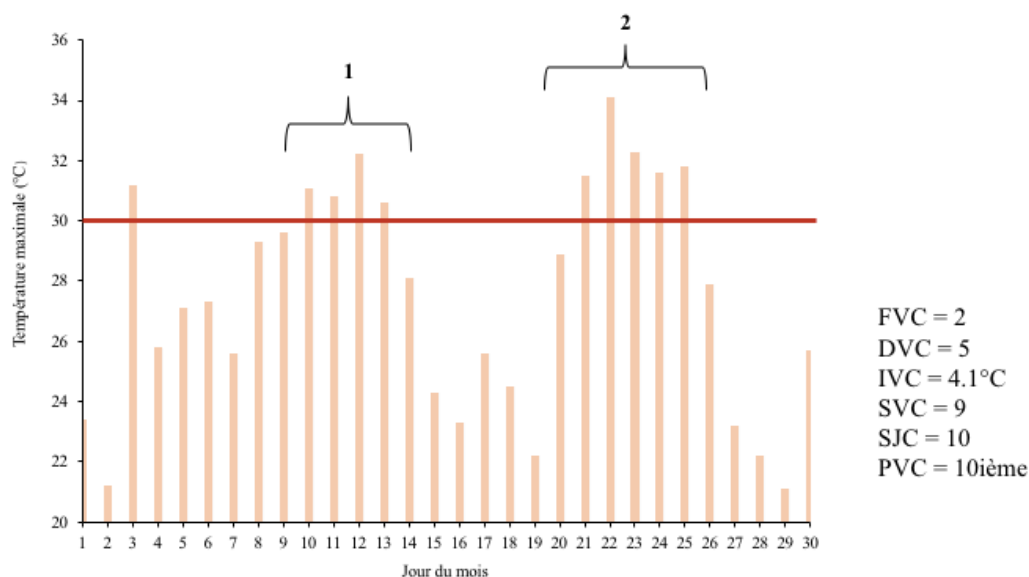


Figure 11. Exemple des composantes analysées concernant les VC sur un mois.

3.4.3 Périodes de chaleur accablante

Afin d'étudier l'évolution des températures ressenties, les périodes de chaleur accablantes (PCA) ont également été analysées. Pour définir les PCA, nous avons utilisé

la même définition que celle des VC, c'est-à-dire une *période d'au moins 3 jours consécutifs* lors desquels la température ressentie (*Humidex*) atteint ou dépasse le seuil. Dans le cas présent, une gamme de seuils compris entre un Humidex de 35 et 40 a été étudiée. Ces seuils d'Humidex ont été sélectionnés puisqu'à ces niveaux, des conséquences néfastes peuvent être ressenties chez les populations vulnérables. Effectivement, un Humidex qui se situe entre 35 et 39 créerait beaucoup d'inconfort et les activités extérieures devraient être réduites ou du moins adaptées. Également un Humidex qui dépasse 40 est considéré comme extrême et il devient dangereux d'y exercer des activités extérieures (ECCC, 2018a). De plus, une méthode de mesure multiple des PCA similaire à la méthode de mesures multiples présentée pour les VC a été utilisée. Voici les composantes des PCA qui ont été analysées pour l'ensemble des seuils préétablis (G. B. Anderson & Bell, 2011; Oleson et al., 2015) :

- g. La fréquence annuelle des périodes de chaleur accablante (FPCA) : le nombre d'événements recensés au cours d'une année;
- h. La durée de la plus longue période de chaleur accablante (DPCA) : le nombre maximal de jours consécutifs lors desquels les températures ont dépassé le seuil [en jour];
- i. L'intensité maximale de la période de chaleur accablante la plus extrême de l'année (IPCA) : la différence entre la température maximale atteinte au cours de la vague de chaleur et le seuil établi [en °C];
- j. La somme des journées annuelles contribuant aux périodes de chaleur accablante (SPCA) : la somme de la durée en jour de toutes les vagues de chaleur survenues pendant l'année [en jour];
- k. La somme des journées chaleur accablantes annuelles (SJCA) : le nombre de journées annuel dépassant le seuil [en jour].

3.4.4 Analyse de la température ressentie

De nombreux indices permettent d'indiquer le confort thermique des individus, tels que l'index de chaleur, la température apparente, le facteur Humidex, l'index d'inconfort ainsi que l'indice de température du thermomètre mouillé simplifié (SWBGT) (Brooke

Anderson et al., 2013). Dans le cadre de notre étude, le facteur Humidex a été étudié pour analyser les PCA. La formule ci-dessous montre comment l’Humidex a été calculé dans le cadre de notre étude à partir de la température de l’air et du point de rosée (ECCC, 2019B). Également dans la figure 12 on peut observer un tableau sommaire présentant l’Humidex estimé selon le point de rosée et la température mesurée (Brooke Anderson et al., 2013).

$$H = T_{air} + h$$

$$H = T_{air} + 0.5555 [e - 10]$$

$$H = T_{air} + 0.5555 \left[6.11 * \exp^{5417.7530 * \left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{273.16 + T_{rosée}} \right)} - 10 \right]$$

Où :

- H est le facteur Humidex
- T_{air} est la température de l’air en °C
- e est la pression de vapeur en hPa (mbar) et est égale à 2,71828
- $T_{rosée}$ est le point de rosée en °C
- $5417,7530$ est une constante arrondie basée sur le poids moléculaire de l’eau, sur la chaleur latente d’évaporation et sur la constante des gaz parfaits

B

Dew point temperature (°C)

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
50	45	45	46	46	47	47	48	50	52	-	-	-	-	-	-	-
48	43	44	44	45	45	45	46	48	49	51	-	-	-	-	-	-
46	42	42	42	43	44	44	45	46	47	49	51	-	-	-	-	-
44	40	40	41	41	42	42	43	44	45	47	49	52	-	-	-	-
42	38	38	39	39	40	40	41	42	43	45	47	49	52	-	-	-
40	36	37	37	38	38	39	39	40	41	43	45	47	49	52	-	-
38	35	35	35	36	36	37	37	38	39	41	42	44	46	49	52	-
36	33	33	34	34	34	35	35	36	37	38	39	41	43	45	48	-
34	32	32	32	33	33	33	33	34	35	36	37	38	40	42	45	-
32	30	30	30	31	31	31	31	32	33	33	34	36	37	39	41	50
30	28	28	28	29	29	29	30	30	31	31	32	33	35	36	38	45
28	26	27	27	27	27	27	28	28	29	29	30	31	32	33	36	-
26	24	25	25	25	25	25	26	26	26	27	27	28	29	30	-	-
24	22	23	23	23	23	24	24	24	24	25	25	26	26	-	-	-
22	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	24	-	-	-	-
20	18	18	18	19	19	19	20	20	21	21	21	-	-	-	-	-

Figure 12. Le facteur Humidex selon la température et le point de rosée entre 20°C et 50°C (Anderson & al, 2013).

3.4.5 *Mesurer l'effet de l'ICU*

Pour mesurer l'effet de l'ICU, les caractéristiques des VC survenues en milieu rural et urbain ont été comparées. Nous avons donc comparé la fréquence, l'intensité et la durée des VC entre les deux régions (G. B. Anderson & Bell, 2011; Fischer et al., 2012; Fischer & Schär, 2010b; Oleson et al., 2015). La distinction entre les régions urbaines et rurales est nécessaire dans le cadre de notre étude, puisqu'on s'intéresse à comparer les effets des VC entre les régions rurales et les régions urbaines. Selon Statistique Canada, au pays il existe des régions urbaines ainsi que des régions rurales. Depuis les années 1970, l'institution canadienne a développé une méthodologie qui permet de classifier les régions. Selon leur méthode, les régions urbaines sont caractérisées par leur densité de population qui doit être d'au moins 400 habitants par kilomètre carré et on doit y retrouver une concentration d'au moins 1 000 habitants au total dans la subdivision de recensement. Toute région qui n'atteint pas cette concentration et densité de population est alors considérée comme une région rurale (Puderer, 2009; Statistique Canada, 2006, 2016a).

3.4.6 *Statistiques pertinentes pour l'analyse*

La régression linéaire a été utilisée afin d'interpréter les tendances des températures passées et futures (Lane, 2003; Olive, 2017) :

$$\hat{y} = a + bx \text{ (eq. 1)}$$

b : pente de la droite et se calcule comme suit :

$$b = r \frac{s_y}{s_x}$$

a : ordonnée à l'origine et se calcule comme suit :

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Où :

- \bar{x} : moyenne de X
- \bar{y} : moyenne d'Y
- s_x : écart-type de X
- s_y : écart-type d'Y
- r : corrélation entre X et Y

Le coefficient de corrélation linéaire (r) a également été utilisé (Currie *et al.*, 2017). Cette méthode sera pertinente afin d'indiquer s'il existe bien un lien statistique entre certaines de nos variables quantitatives. Une corrélation est positive si l'augmentation d'une des variables entraîne l'augmentation de l'autre. Au contraire, elle est négative si l'augmentation des valeurs d'une variable entraîne la diminution de l'autre variable (Currie *et al.*, 2017). Le coefficient de corrélation linéaire varie entre -1 et 1, plus il est près de -1 ou de 1, plus le lien est fort et plus il est près de 0 plus le lien est faible (Currie *et al.*, 2017). De plus, à l'aide du coefficient de corrélation linéaire (r), nous allons pouvoir étudier le coefficient de détermination linéaire (R carré ou R^2). Le coefficient de détermination permet pour sa part de juger de la qualité d'une régression linéaire. Par exemple, si le R^2 est nul, la distribution des points ne peut être expliquée par un modèle mathématique. Voici la formule du coefficient de corrélation linéaire ainsi que son tableau d'interprétation (Currie *et al.*, 2017):

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n})(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n})}}$$

Où :

- X : valeur de x
- Y : valeur de y
- n : nombre de paires de x,y

Tableau 4. Interprétation du coefficient de corrélation.

Valeur absolue du coefficient de corrélation linéaire $ r $	Relation linéaire
$0 < r < 0,2$	Nul à faible
$0,2 < r < 0,4$	Faible à moyenne
$0,4 < r < 0,7$	Moyenne à forte
$0,7 < r < 0,9$	Forte à très forte
$0,9 < r < 1$	Très forte à parfaite

Enfin, afin de déterminer si les tendances que nous avons obtenues ont une signification statistique, nous allons utiliser le test t (Currie *et al.*, 2017). Dans le cas de notre étude, ceci va nous être pertinent puisque nous allons pouvoir observer si les VC enregistrées dans les dernières années sont significativement plus intenses, fréquentes et longues que la normale. Le test t ressemble beaucoup à la fonction mathématique de la distribution normale, soit une distribution symétrique. Pour réaliser un test de signification, nous devons d'abord établir notre hypothèse nulle (H_0) ainsi que notre hypothèse alternative (H_a). Notre H_0 est celle que nous allons tenter d'accepter ou de rejeter. Nous allons ensuite établir notre H_a , soit l'hypothèse la plus probablement en cas de rejet de l' H_0 . La valeur de t , peut être mesurée à l'aide de cette formule (Currie *et al.*, 2017; Kenton & Westfall, 2020) :

$$t = \frac{(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\left(\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)}\right) + \left(\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}\right)}}$$

Où :

- \bar{Y}_1 et \bar{Y}_2 : sont les moyennes des échantillons
- n_1 et n_2 : sont le nombre de mesures dans chaque échantillon
- s_1 et s_2 : sont les écarts-types des échantillons

Par la suite, nous serons en mesure de déterminer la probabilité d'obtenir notre valeur de t selon la distribution et d'accepter une des hypothèses (Currie *et al.*, 2017). Par convention, un alpha de 0,05 est utilisé dans la majorité des études scientifiques et

représente le « niveau de probabilité au-delà duquel nous déclarons la valeur de t comme étant trop improbable pour que l'hypothèse nulle soit vraie » (Currie *et al.*, 2017. p. 95) (Currie *et al.*, 2017). Ceci étant dit, si lors de notre analyse statistique, la valeur de p est inférieure ou égale à la valeur alpha de 0,05 alors l' H_0 est rejetée et nous avons donc une donnée statistique significative (Currie *et al.*, 2017). Au contraire, si notre valeur de p est plus grande que la valeur alpha de 0,05 l' H_0 est acceptée puisqu'il n'y a pas d'évidence pour la rejeter (Currie *et al.*, 2017).

3.4.7 Logiciel

Le logiciel RStudio a été principalement utilisé pour le traitement de données et pour réaliser les analyses statistiques nécessaires à la recherche. Ce logiciel permet de traitement de données entre autres grâce aux modules (packages) que l'on peut télécharger pour faciliter les calculs et les analyses statistiques. Pour organiser les données météorologiques, nous avons utilisé le module « TidyR », un outil développé pour les données désorganisées à traiter. Pour analyser les VC, nous avons utilisé le module « HeatwaveR », un outil développé pour analyser les VC autant marines qu'atmosphériques selon différentes définitions (Robert W. Schlegel and Albertus J. Smit, 2018). La fonction « detect_event » a principalement été utilisée puisqu'elle permet d'identifier les VC dans les données estivales selon les définitions de VC sélectionnée préalablement dans l'étude (Robert W. Schlegel and Albertus J. Smit, 2018). La fonction « exceedance » a également été très pertinente pour l'étude puisqu'elle permet d'identifier des journées consécutives lors desquelles le seuil était atteint ou dépassé (Robert W. Schlegel and Albertus J. Smit, 2018). Tout le code informatique pour étudier les normales climatiques; analyser les tendances

des VC; analyser les tendances des PCA et pour analyser les tendances entre les régions rurales et urbaines sont présentées en annexe.

Chapitre 4 Tendances des vagues de chaleur au sud-est du Canada depuis le début du 20^e siècle

4.1 Introduction

Les vagues de chaleur (VC), généralement définies comme une période de trois jours consécutifs lors desquels les températures enregistrées sont largement supérieures à la normale, sont un des événements extrêmes qui aurait été amplifié par les changements climatiques (CC) (GIEC, 2021). Effectivement, au cours des dernières années, une augmentation de la fréquence, de l'intensité, de la précocité ou la durée des VC a été observée dans plusieurs régions du globe. De plus, selon les projections, ce phénomène s'amplifiera davantage dans les années à venir dues la hausse des températures globales moyennes (Clark et al., 2006; GIEC, 2021; Mazdidasni et al., 2019; Mazdidasni & AghaKouchak, 2015; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Smith et al., 2013).

Au Canada, les tendances historiques des VC ont été peu étudiées. En effet, seules quelques études ont adressé les impacts du phénomène, mais peu d'études se sont intéressées à l'analyse climatologique de leurs tendances historiques (FMEQ, 2019; PCC, 2019; Santé Canada, 2011b, 2011a). L'étude qui suit présente donc une analyse des tendances des VC depuis le début du 20^e siècle de trois régions métropolitaines de recensements (RMR) situées au sud-est du Canada, soit Montréal, Ottawa et Toronto. L'objectif principal de cette recherche fut de développer une compréhension approfondie du phénomène au sud du pays en étudiant différentes caractéristiques des VC afin de déterminer si une amplification du phénomène est observée au pays comme ailleurs dans le monde. Cette recherche tente également d'étudier les tendances historiques des périodes

de chaleur accablantes (PCA) afin de mieux comprendre l'évolution des températures ressenties au cours des dernières décennies. Enfin, des analyses comparatives réalisées entre les régions urbaines et rurales permettent de mieux comprendre les répercussions du phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU) en période de VC.

4.2 Revue de la littérature

4.2.1 Tendances mondiales

Selon plusieurs études réalisées à l'international, les VC font partie des événements météorologiques extrêmes qui auraient été amplifiés par les CC (FMEQ, 2019; GIEC, 2021; PCC, 2019; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins & Alexander, 2013; Robert W. Schlegel and Albertus J. Smit, 2018; Santé Canada, 2011a, 2011b). En effet, il existerait une corrélation entre le réchauffement du climat mondial et l'augmentation de la fréquence, de l'intensité, de la durée et de la précocité des VC depuis le milieu du 20^e (Basara et al., 2010; FMEQ, 2019; GIEC, 2021; Herring et al., 2019; Oudin Åström et al., 2011; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012). Il est également possible de remarquer que, depuis le début du 21^e siècle, plusieurs VC particulièrement sévères sont survenues à répétitions dans diverses régions du monde causant des taux de mortalité élevés (Founda et al., 2019; Mazdiyasi et al., 2019; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Russo et al., 2017; Smith et al., 2013).

Or, bien que des VC soient expérimentées chaque année au Canada, les études concernant les changements du phénomène se sont majoritairement concentrées aux États-Unis, en Europe, en Asie et en Australie (GIEC, 2021; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Robert W. Schlegel and Albertus J. Smit, 2018; Sanderson et al., 2017;

Smith et al., 2013). Ces études ont permis de mettre en lumière le fait que les événements de VC ont bel et bien augmentées en fréquence, en durée, en précocité ainsi qu'en intensité au cours des dernières années dues à la hausse des températures moyennes (GIEC, 2021; Mazdiyasi et al., 2019; Mazdiyasi & AghaKouchak, 2015; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Smith et al., 2013). Pratiquement toutes les régions du monde auraient enregistré des changements au niveau des caractéristiques des VC, mais c'est la fréquence qui aurait augmenté le plus rapidement et de façon plus significative comparativement à la durée et l'intensité (Perkins-Kirkpatrick & Gibson, 2017; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). Certaines études ont également démontré une augmentation de l'intensité des événements de chaleur extrême, mais ces tendances seraient seulement significatives pour certaines régions (GIEC, 2021; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013). Enfin, selon de nombreuses projections réalisées un peu partout au monde, il est clair qu'au cours du prochain siècle ces événements de chaleur vont s'intensifier davantage sur tous les continents (Clark et al., 2006; Fischer & Schär, 2010a; GIEC, 2021; Khaliq et al., 2005; Meehl & Tebaldi, 2004; Perkins-Kirkpatrick & Gibson, 2017; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013).

4.2.2 Événement de chaleur au sud-est du Canada

Au sud-est du Canada, des VC extrêmes se produisent régulièrement, il est donc normal de faire face à un ou quelques-uns de ces événements chaque année. Dans la région à l'étude, ce phénomène survient durant les mois les plus chauds d'été, de mai à septembre, et est généralement causé par les masses d'air chaud et humide qui proviennent du golfe du Mexique et du sud des États-Unis (ECCC, 2018a). Par contre, au Canada,

l'augmentation des températures atmosphériques moyenne est plus drastique puisque le réchauffement du climat est intensifié dans les hautes latitudes (Conseil des académies canadiennes, 2019; ECCC, 2018a; Z. Li et al., 2018). Effectivement, depuis le début du 20^e siècle, la température moyenne aurait augmenté de 1.9 °C au sud du Canada comparativement à une augmentation mondiale inférieure à 1 °C par rapport au niveau de l'ère préindustrielle (ECCC, 2019; Field et al., 2014; FMEQ, 2019; Zhang, X., 2019). En Ontario et au Québec, on remarque une augmentation de 1.3°C et de 1.1°C respectivement de la température moyenne annuelle entre les années 1948 et 2016 (Zhang, X., 2019). De plus, au Canada il aurait une augmentation claire de l'intensité ainsi que de la fréquence des journées chaudes extrêmes (GIEC, 2021). Dans ce cas, serait-il possible d'observer une augmentation des VC plus importante que dans d'autres régions du monde ?

4.2.3 Définition

Bien que les VC soient un phénomène courant, il est très complexe d'analyser, de modéliser et de comparer leurs tendances puisqu'il n'existe pas de définition officielle du phénomène (Dahl et al., 2019; Deo et al., 2007; Lebel et al., 2017; Z. Li et al., 2018; Meehl & Tebaldi, 2004; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Sanderson et al., 2017; Smith et al., 2013; Xu et al., 2016; Yusa et al., 2015). Ceci est dû au fait que les climats de toutes les régions sont diversifiés et qu'il existe une variété de raison d'étudier les VC (santé publique, agriculture, économie, climatologie, etc.) (Guttorp, 2010; Lyon & Barnston, 2017; Smith et al., 2013). Seulement au Canada, plusieurs définitions du phénomène existent et varient généralement en fonction de la région puisque le climat du territoire canadien est très diversifié (Lebel et al., 2017; Santé Canada, 2008, 2011b, 2011a). Par contre, de façon générale, le terme vague de chaleur fait référence à une situation lors

de laquelle les températures expérimentées sont supérieures aux moyennes saisonnières, et ce pendant une période de temps qui perdure (Atlas climatique du Canada, 2019; Climate data, n.d.; Deo et al., 2007; ECCC, 2020; FMEQ, 2019; PCC, 2019). Dans le cadre de cette étude, les définitions suivantes de VC par les institutions reconnues au Canada ont été analysées.

Tableau 5. Définitions de VC selon différentes institutions canadiennes.

Source	Région	Durée minimale	Indicateur de température		
			Tmax ^a	Tmin ^b	Hmax ^c
Martel et al, 2010	Outaouais	3	31°C	16°C	-
Martel et al, 2010	Montréal	3	33°C	20°C	-
Santé Canada, 2011	Ensemble du Canada	3	32°C	-	-
Chebana et al, 2013	Outaouais	3	31°C	18°C	40
Chebana et al, 2013	Montréal	3	33°C	20°C	40
Météo Média, 2018	Ensemble du Québec	3	30°C	-	-
Li et al., 2018	Ensemble du Canada	5	5°C + que la normale	-	-
Atlas Canada, 2019	Ensemble du Canada	3	30°C	-	-
FMEQ, 2019	Ensemble du Québec	3	30°C	-	-
Praries Climate Center, 2019	Ensemble du Canada	3	30°C	-	-
CIUSSS du Centre-Sud-De-l'Ile-De-Montréal, 2019	Montréal	3	33°C	20°C	-
Lebel et al, 2019	Outaouais	3	31°C	18°C	-
Lebel et al, 2019	Montréal	3	33°C	20°C	-
ECCC, 2020	Ontario	2	31°C	20°C	40
ECCC, 2020	Québec	2	30°C	-	40

a. Tmax = Température maximale diurne

b. Tmin = Température minimale nocturne

c. Hmax = facteur Humidex maximal diurne

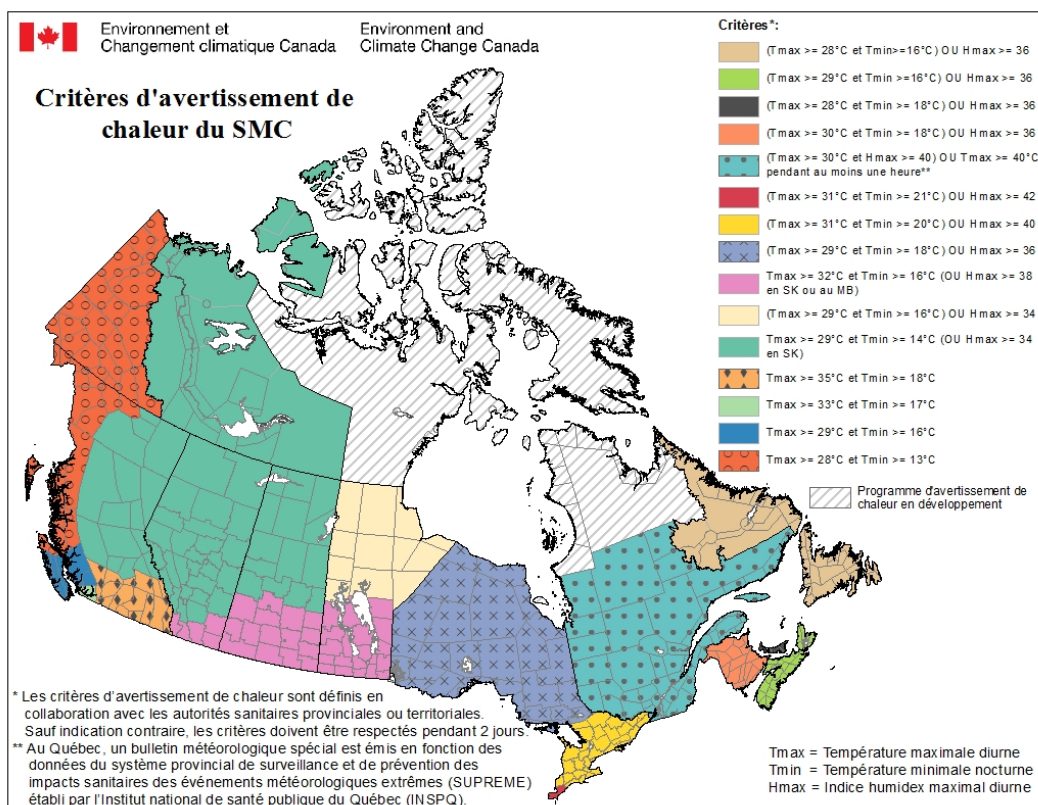


Figure 13. Critères d'avertissement de chaleur pour l'ensemble du Canada (ECCC, 2020).

4.2.4 Humidex et îlot de chaleur urbain

L'impact des températures ressenties sur les populations en période de VC est très grand (Deo et al., 2007; Dunne et al., 2013; D. Li et al., 2020). Les températures ressenties peuvent être mesurées de différentes façons, mais dans la majorité des cas, elles sont le résultat de deux variables, soit la température et l'humidité (ECCC, 2018a; Santé Canada, 2011b; Smoyer-Tomic et al., 2003). Les températures ressenties sont souvent la mesure utilisée par les autorités pour déclarer une situation dangereuse pour la population puisqu'elles sont reliées à un taux de mortalité plus élevé (Dahl et al., 2019; Deo et al., 2007). Le facteur Humidex est une des mesures les plus reconnues au Canada pour analyser la température ressentie par le corps en humain en période de chaleur de façon adéquate (Chebana et al., 2013; Dahl et al., 2019; Delworth et al., 1999; ECCC, 2020; Smoyer et al.,

2000). Le facteur Humidex est calculé en combinant la température ambiante en °C et l'humidité contenue dans l'air. Ce dernier se mesure grâce au thermomètre mouillé qui nous indique le point de rosée en °C.

Tableau 6. Humidex et niveau d'inconfort ressenti (ECCC, 2020).

Humidex	Niveau d'inconfort ressenti*
20 < H < 29	Un peu d'inconfort
30 < H < 39	Un certain inconfort
40 < H < 45	Beaucoup d'inconfort
46 < H	Dangereux

* Le niveau de confort ou d'inconfort humain est déterminé par la température ambiante ainsi que l'humidité. À cela, s'ajoute la capacité de chaque individu à contrôler sa chaleur corporelle (Oleson et al., 2015).

Dans les environnements urbains, les périodes de chaleur sont amplifiées par les conditions atmosphériques locales, c'est ce qu'on appelle l'effet de l'ICU (Basara et al., 2010; CCES, n.d.; Fischer & Schär, 2010a; FMEQ, 2019; Harlan et al., 2013; Oleson et al., 2015; Santé Canada, 2011b). Dans les zones urbaines, on y retrouve habituellement une forte densité de population, une concentration élevée de bâtiments, peu d'espace vert, une charge thermique accrue et beaucoup de circulation (Harlan et al., 2013). Or, les infrastructures bâties ont une capacité de conservation de la chaleur plus élevée et sont sujettes à un plus grand réchauffement que les surfaces naturelles (CCES, n.d.; Harlan et al., 2013; Santé Canada, 2011b). De plus, dans les zones urbaines, on retrouve souvent un effet d'Humidex plus élevé étant donné que les vents bloqués par les bâtiments sont moins importants et qu'il y a moins d'évapotranspiration (Basara et al., 2010; Oleson et al., 2015). Enfin, le plus grand problème avec les zones urbanisées est le fait que même lorsque la nuit tombe, la température reste relativement élevée comparativement aux zones rurales (CCES, n.d.; Oleson et al., 2015; PCC, 2019; Santé Canada, 2011b; Smoyer et al., 2000; Snider, 2016). On remarque donc que le stress thermique vécu dans les grandes villes est plus élevé et beaucoup plus perceptible pendant la nuit (Fischer & Schär, 2010a; Harlan et

al., 2013; Oleson et al., 2015; PCC, 2019; Santé Canada, 2011b). Bien que l'effet de l'ICU soit bien documenté, peu d'études se penchent sur l'effet de l'ICU durant les événements extrêmes de VC, alors qu'il existerait une différence dans l'intensité des VC expérimentées entre les zones rurales et urbaines (Basara et al., 2010; Fischer et al., 2012; Harlan et al., 2013).

4.3 Méthodologie

4.3.1 Sites d'étude

Les villes d'Ottawa-Gatineau, de Montréal ainsi que de Toronto ont été sélectionnées comme sites d'étude. Ces trois villes principales ont été choisies puisqu'on y retrouve des températures estivales élevées par rapport au reste du Canada en plus d'y retrouver un taux d'humidité important (Santé Canada, 2011b, 2011a). En effet, ces villes sont situées dans une zone climatique continentale tempérée avec des hivers plutôt froids, suivi d'une période estivale humide et chaude alimentée par les cellules d'air provenant de l'océan Atlantique et du golfe du Mexique (Baldwin et al., 2000; ECCC, 2020; Z. Li et al., 2018; Smoyer-Tomic et al., 2003; Smoyer et al., 2000). De plus, Santé Canada identifie les régions entourant la vallée du fleuve du Saint-Laurent couvrant autant le Québec que l'Ontario comme les régions les plus susceptibles de faire face à des VC au pays (Santé Canada, 2011a; Smoyer-Tomic et al., 2003).

4.3.2 Données

La récolte de données historiques sur le climat a été réalisée entièrement en ligne grâce aux portails web *Données climatiques historiques* d'ECCC ainsi que *Données*

Climatiques Canada. Les sites choisis devaient respecter les critères de sélection suivants :

- (1) avoir une période d'enregistrement supérieure à 30 ans, (2) avoir moins de 20% de données manquantes et (3) enregistrer la température journalière et/ou horaire.

Tableau 7. Stations à l'étude.

Site d'étude	Milieu	Nom de la station	Période d'enregistrement	Numéro d'identification	Latitude	Longitude
Site A – Ottawa-Gatineau	Urbain	Ottawa CDA	1889-2020	6105978	45.38333333	-75.71666667
		Ottawa Macdonald Cartier Intl A	1938-2020	6106000	45.3225	-75.66916667
	Rural	Chelsea	1927-2020	7031360	45.51666667	-75.78333333
Site B – Montréal	Urbain	Montréal Pierre Elliott Trudeau Intl A	1941-2020	7025250	45.46666667	-73.74166667
	Rural	Oka	1937-2020	7015730	45.5	-74.06666667
Site C - Toronto	Urbain	Toronto Lester B Pearson Intl A	1937-2013	6158733	43.6772222	-79.630556
		Toronto Intl A	2013-2020	6158731	43.6766667	-79.630556

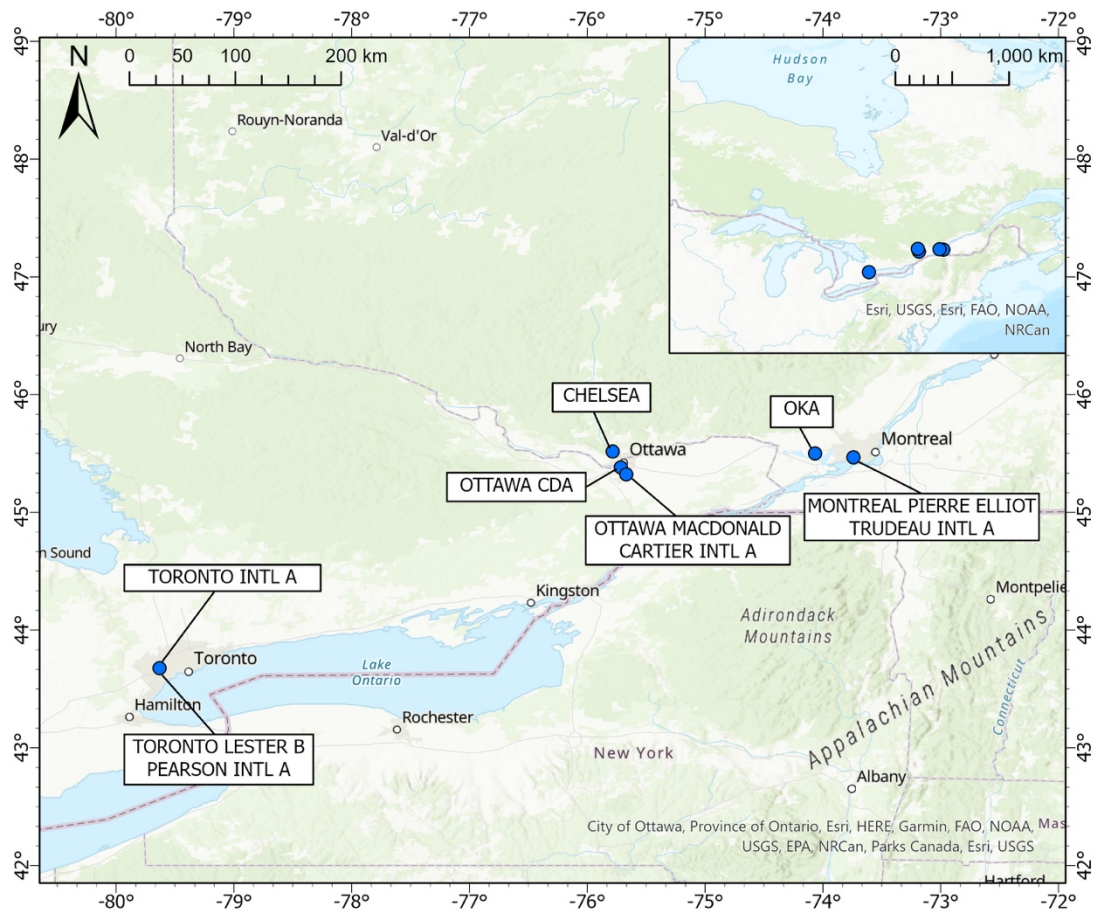


Figure 14. Stations à l'étude.

4.3.3 Analyses

Tel que discuté précédemment, une VC peut être définie comme une période lors de laquelle les températures enregistrées ont dépassé un certain seuil classifié comme étant anormalement chaud pour la région, et ce pour plusieurs journées consécutives. Par contre, le seuil établi et le nombre minimal de journées consécutives dépendent de l'objectif de l'étude ainsi que de la région étudiée (Perkins & Alexander, 2013). Puisque les définitions et les seuils actuellement présentés par les institutions canadiennes varient énormément de région en région et dépendent de nombreux facteurs, dans le cadre de notre étude, une même définition des VC comprenant une gamme de seuils a été étudiée (Chebana et al., 2013). La définition sélectionnée mentionne qu'une *VC survient lorsque la température maximale atteint ou dépasse le seuil pendant au moins trois jours consécutifs* et les seuils compris entre 30°C et 33°C ont été étudiés. Cette définition a été choisie suite à une revue des définitions établies par les autorités nationales et provinciales canadiennes disponibles dans la littérature scientifique (Perkins & Alexander, 2013). Ces seuils ont été sélectionnée puisque ce sont des seuils pour lesquels les populations affectées pourraient ressentir des effets néfastes si ces conditions surviennent pour plusieurs heures ou journées consécutives. Cette approche nous permet d'observer les tendances selon une variété de seuils, ce qui peut renforcer et vérifier la robustesse des résultats obtenus. Ceci nous permet également de démontrer si le seuil joue un rôle au niveau des conclusions obtenues des tendances des VC.

De plus, une méthode de mesures multiples des VC a été utilisée. Voici les composantes des VC qui ont été analysées pour l'ensemble des seuils préétablis (G. B. Anderson & Bell, 2011; Oleson et al., 2015) :

- La fréquence annuelle des vagues de chaleur (FVC) : le nombre d'événements recensé au cours d'une année;
- La durée de la plus longue vague de chaleur de l'année (DVC) : le nombre maximal de jours consécutifs lors desquels les températures ont dépassé le seuil [en jour];
- L'intensité maximale des vagues de chaleur (IVC) : la différence entre la température maximale atteinte au cours de la vague de chaleur et le seuil établi [en °C];
- La somme des journées annuelles contribuant aux vagues de chaleur (SVC) : la somme de la durée en jour de toutes les vagues de chaleur survenues pendant l'année [en jour];
- La somme des journées chaudes annuelles (SJC) : le nombre de journées annuel dépassant le seuil [en jour];
- La précocité de la vague de chaleur (PVC) : la date du premier événement survenu en début de saison [en jours depuis le premier mai].

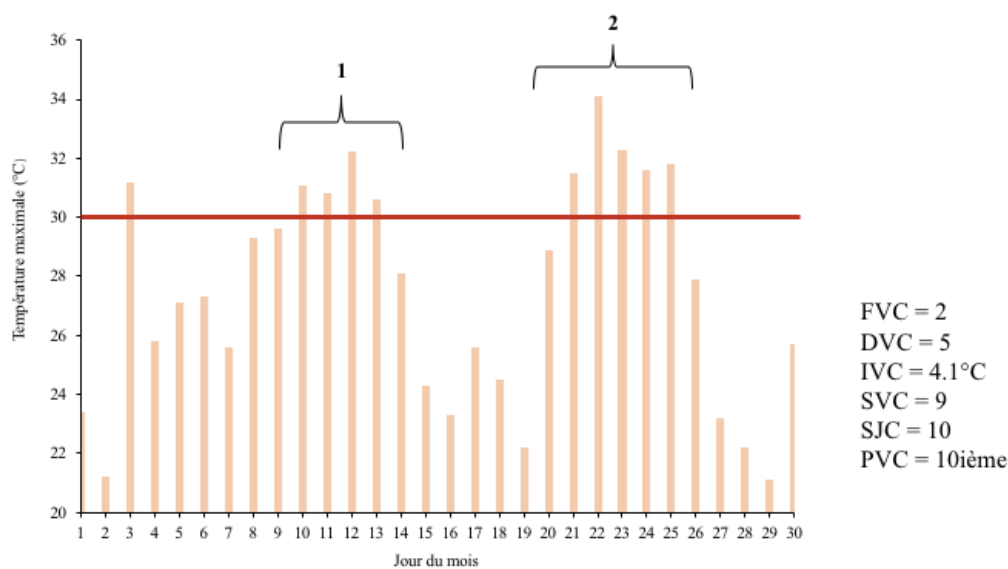


Figure 15. Exemple des composantes analysées concernant les VC sur un mois.

Afin d'étudier l'évolution des températures ressenties, les périodes de chaleur accablantes (PCA) ont également été analysées. Pour définir les PCA, nous avons utilisé la même définition que celle des VC, c'est-à-dire une *période d'au moins 3 jours consécutifs* lors desquels la température ressentie (*Humidex*) atteint ou dépasse le seuil. Dans le cas présent, une gamme de seuils compris entre un Humidex de 35 et 40 a été étudiée. Ces seuils d'Humidex ont été sélectionné puisqu'à ces niveaux, des conséquences néfastes peuvent être ressentie chez certaines populations vulnérables. Effectivement, un

Humidex qui se situe entre 35 et 39 créerait beaucoup d'inconfort et les activités extérieures devraient être réduites ou du moins adaptées. Également un Humidex qui dépasse 40 est considéré comme extrême et il devient dangereux d'y exercer des activités extérieures (ECCC, 2018a). De plus, une méthode de mesure multiple des PCA similaire à la méthode de mesure multiple présentée pour les VC a été utilisée. Voici les composantes des PCA qui ont été analysées pour l'ensemble des seuils préétablis (G. B. Anderson & Bell, 2011; Oleson et al., 2015) :

- l. La fréquence annuelle des périodes de chaleur accablante (FPCA) : le nombre d'événements recensé au cours d'une année;
- m. La durée de la plus longue période de chaleur accablante (DPCA) : le nombre maximal de jours consécutifs lors desquels les températures ont dépassé le seuil [en jour];
- n. L'intensité maximale de la période de chaleur accablante la plus extrême de l'année (IPCA) : la différence entre la température maximale atteinte au cours de la vague de chaleur et le seuil établi [en °C];
- o. La somme des journées annuelles contribuant aux périodes de chaleur accablante (SPCA) : la somme de la durée en jour de toutes les vagues de chaleur survenues pendant l'année [en jour];
- p. La somme des journées chaleur accablantes annuelles (SJCA) : le nombre de journées annuel dépassant le seuil [en jour].

4.4 Résultats

4.4.1 Températures et précipitations

Les tendances des températures moyennes, maximales et minimales, de même que les précipitations pour chacun des sites ont été analysées afin de bien comprendre l'évolution des variables climatiques de la région d'étude. Pour chacun des sites, il est possible d'observer une augmentation significative des températures moyennes annuelles au cours du 20^e et 21^e siècle. En effet, les températures annuelles auraient augmenté d'environ 2°C pour la période d'étude. La région d'Ottawa serait passée d'une température annuelle

moyenne de 5°C à 7°, Montréal de 6°C à 7.5°C et Toronto de 7°C à 9°C. Les températures moyennes pour la période estivale (mai à septembre) ont également augmenté de façon significative, mais la tendance à la hausse est légèrement moins marquée que pour les températures annuelles. De plus, selon nos analyses des moyennes mensuelles, il a été possible de remarquer que les températures moyennes des mois de juillet, août et septembre ont augmenté plus drastiquement que les mois de mai et juin.

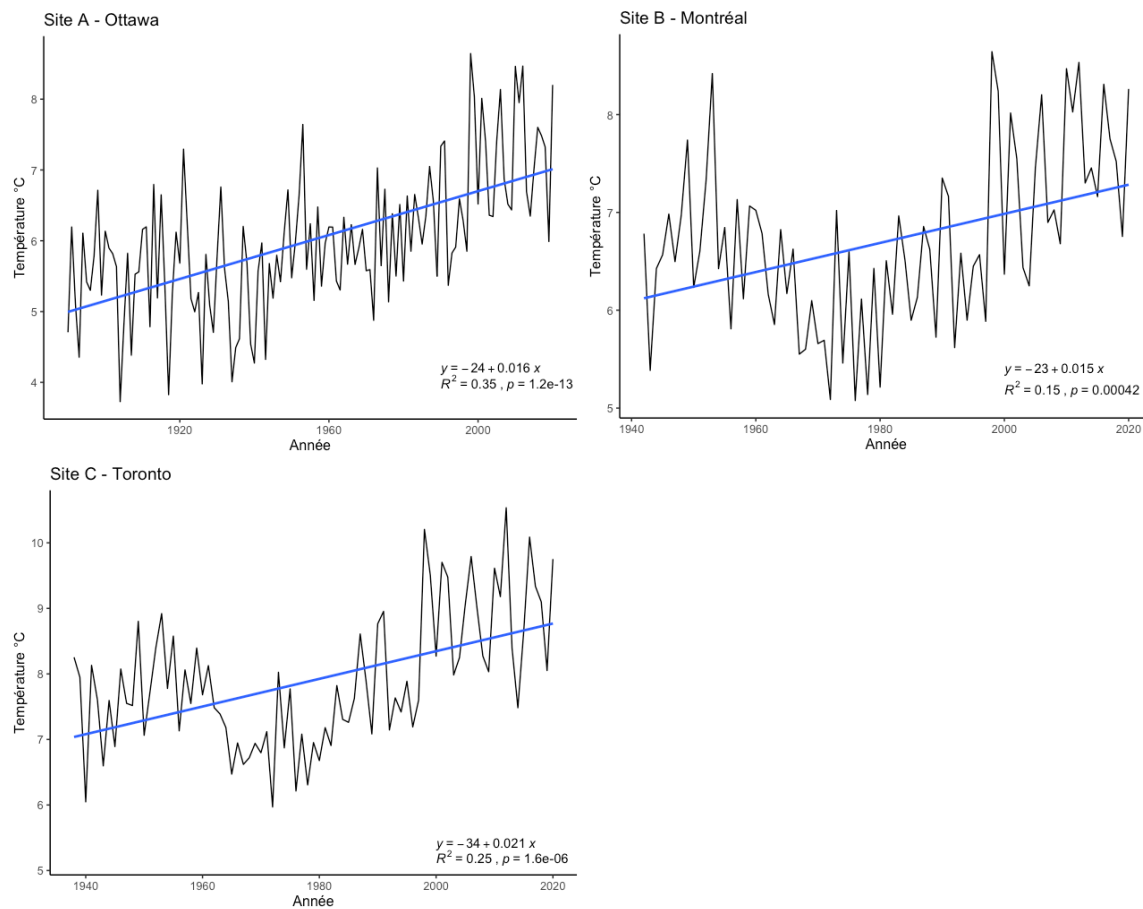


Figure 16. Température annuelle moyenne aux sites d'étude.

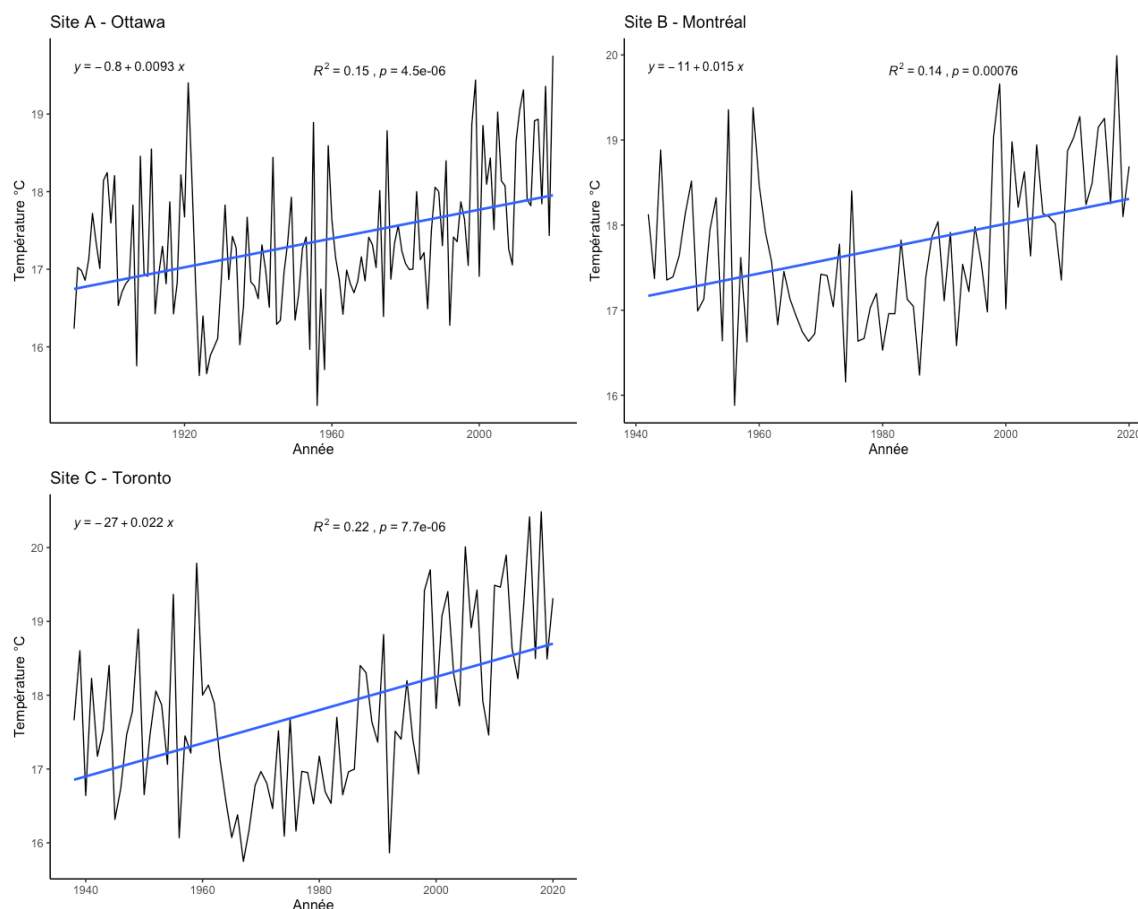


Figure 17. Température estivale moyenne aux sites d'études.

Pour leur part, les températures moyennes minimales ont significativement augmenté pour l'ensemble des mois d'été dans la région, on observe une hausse d'environ 2 à 3°C. Les températures moyennes maximales des mois d'été semblent avoir connues une augmentation moins marquée, soit de moins de 1°C. En effet, on retrouve des tendances significatives à la hausse seulement pour Montréal, tandis que Toronto et Ottawa connaissent plutôt une tendance stable. Enfin, les précipitations pour la période estivale sont légèrement à la hausse.

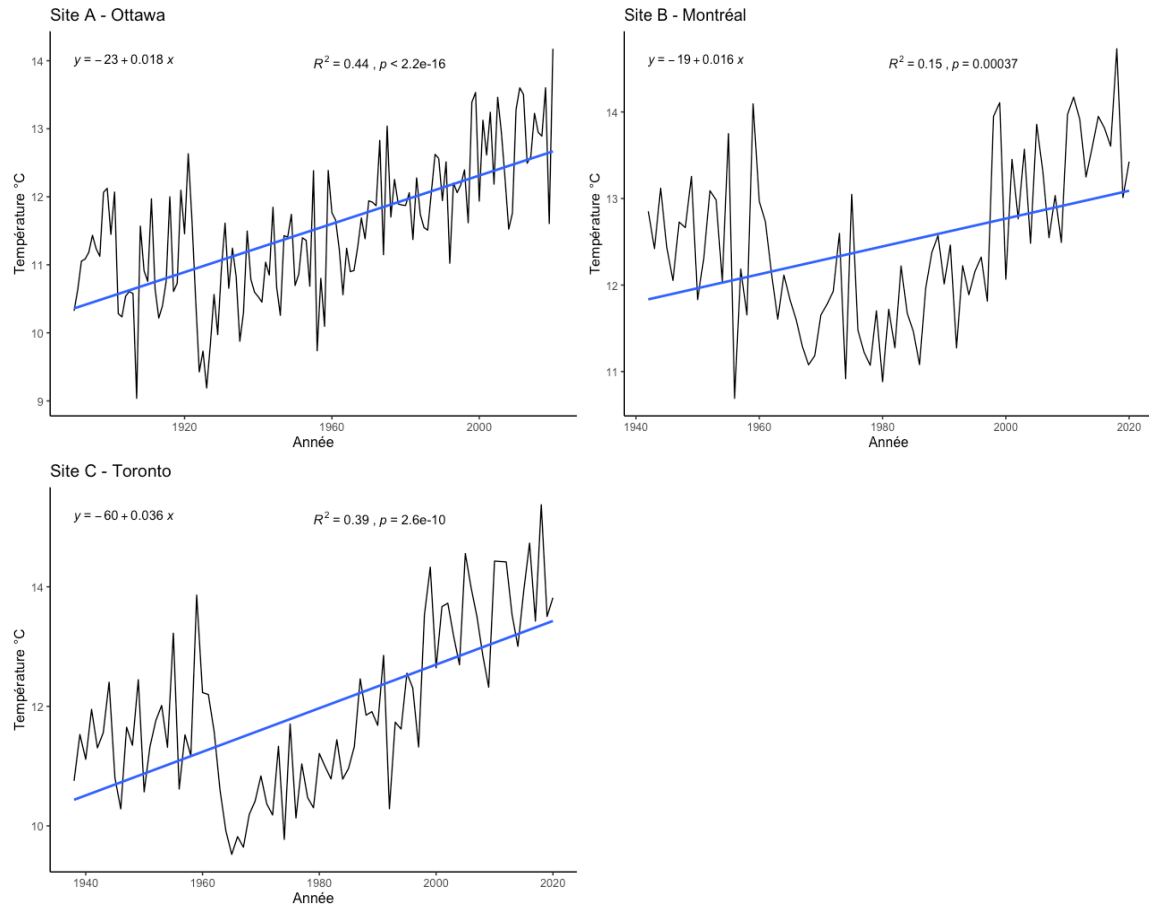


Figure 18. Température estivale minimale moyenne aux sites d'étude.

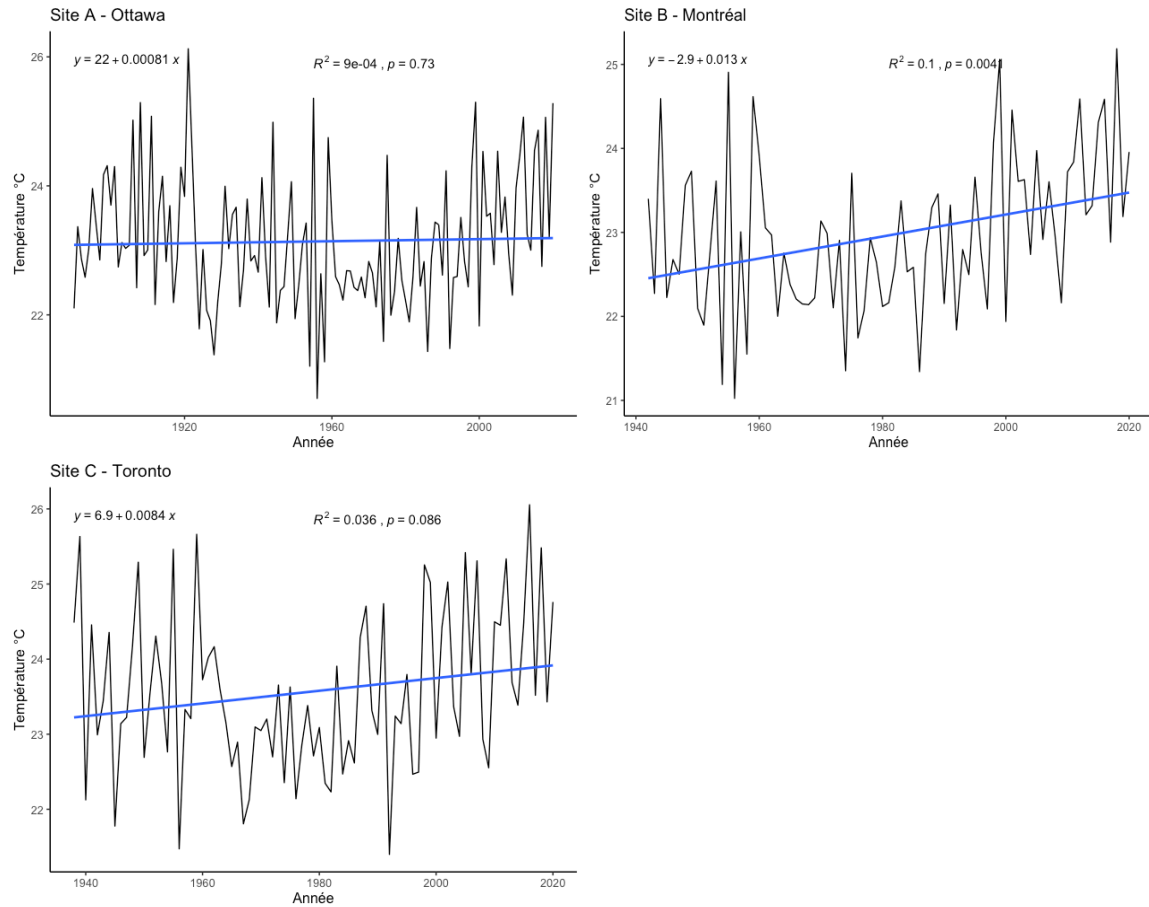


Figure 19. Température estivale maximale moyenne aux sites d'étude.

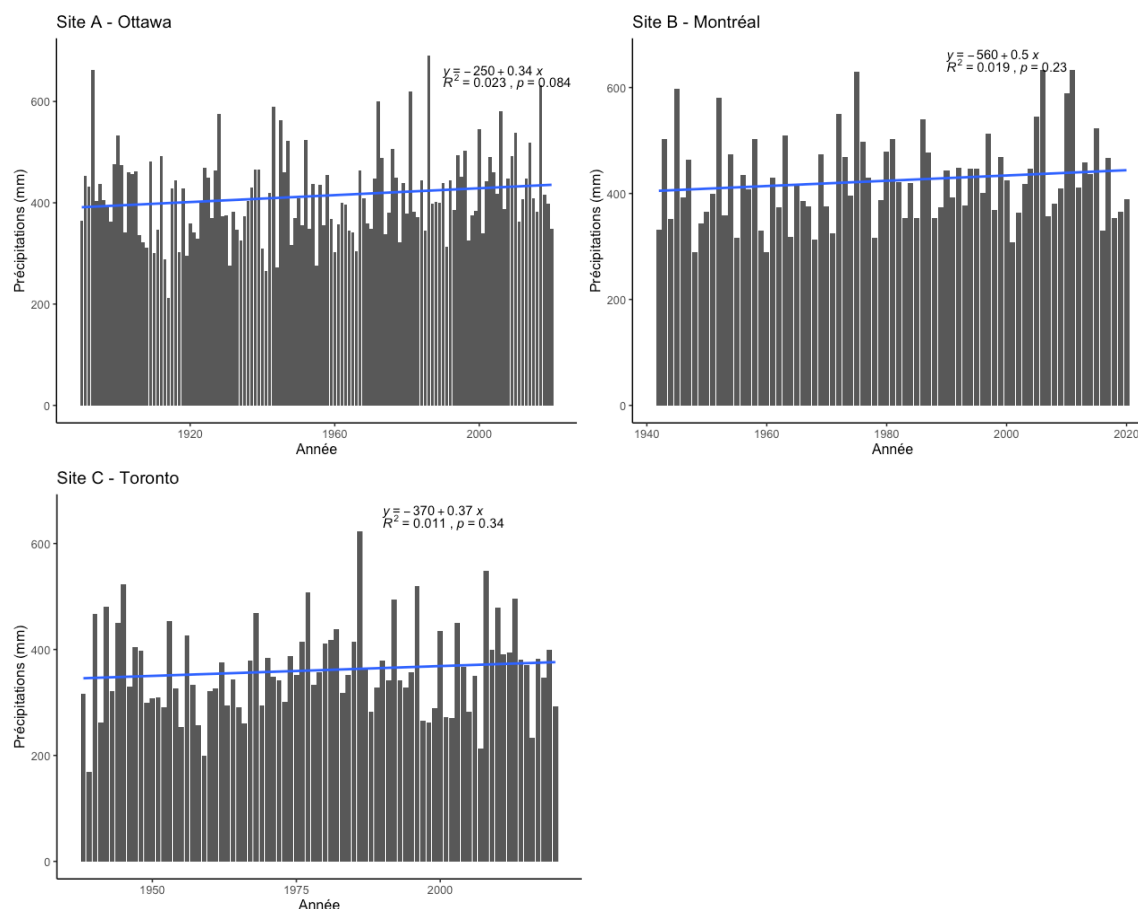


Figure 20. Moyenne estivale des précipitations aux sites d'étude.

Bref, il est possible d'observer les mêmes tendances aux trois sites d'étude durant la période estivale. En effet, on remarque une tendance à la hausse assez marquée pour les températures moyennes et minimales, alors qu'on observe des tendances plus faibles pour les températures maximales et les précipitations. Pour la région de Montréal et Toronto, la période avec des températures plus basses que la normale expérimentée au cours des années 1980 est facilement identifiable et du coup pourrait donner l'impression d'une hausse plus marquée des températures après 1980. Au contraire, à Ottawa-Gatineau, puisque la période d'analyse retourne jusqu'à la fin du 19^e siècle, les années 1920 à 1940 qui ont été très chaudes (période du Dust bowl) rivalisent avec les années récentes et font en sorte que les tendances sur le long terme sont plus stables.

Enfin, si on s'intéresse aux étés les plus chauds aux sites d'étude, on remarque que les mêmes étés très chauds ressortent à chacun des sites. De plus, on remarque que la majorité des étés très chauds sont survenus au cours du 21^e siècle (2018, 2012, 2011, 2005, 2016, 2015). Les étés de 1955, 1959 et de 1999 qui ont été exceptionnellement chauds dans notre région ressortent également dans les tendances.

Tableau 8. Les 10 étés les plus chauds aux différents sites d'étude.

Ottawa-Gatineau		Montréal		Toronto	
Année	C°	Année	C°	Année	C°
2020*	19.8	2018	19.9	2018	20.5
1999	19.4	1999	19.7	2016	20.5
1921	19.4	1959	19.4	2005	20.0
2018	19.4	1955	19.4	2012	19.9
2012	19.3	2012	19.3	1959	19.8
2011	19.1	2016	19.3	1999	19.7
2005	19.0	2015	19.2	2010	19.5
2016	18.9	1998	19.0	2011	19.5
2015	18.9	2011	19.0	2007	19.4
1955	18.9	2001	18.9	1998	19.4

* Données manquantes lors du mois mai 2020 à Ottawa-Gatineau, ce qui peut expliquer son classement dans le tableau.

4.4.2 Vagues de chaleur

4.4.2.1 Ottawa

La fréquence annuelle des vagues de chaleur (FVC), c'est-à-dire le nombre de VC par année, à Ottawa semble avoir légèrement diminué depuis le début de la période d'enregistrement, mais on ne retrouve aucune tendance significative, et ce même selon les différents seuils. Avec un seuil de 33°C, très peu de vagues de chaleur sont détectées chaque année, seulement 30 des 130 années expérimentent des vagues de chaleur. Avec un seuil de 30°C, plus de vagues de chaleur sont détectées, environ 110 des 130 années expérimentent au moins une vague de chaleur. En 1955, le record de FVC a été atteint avec sept VC enregistrés en un été selon un seuil de 30°C. Au niveau de la somme totale des journées participant aux vagues de chaleur (SVC), on remarque aussi que les tendances

sont aussi légèrement à la baisse, et encore une fois, il n'y a aucune tendance significative. De façon générale, la région d'Ottawa enregistre un peu plus de 10 journées de VC par années selon un seuil de 30°C. Le maximum de journée de VC a été atteint en 1955, alors que 32 jours de VC ont été recensés.

Pour ce qui est de la durée de la plus longue vague de chaleur de l'année (DVC), on observe la même tendance, soit qu'entre les années 1890 et 2020, la durée maximale semble avoir légèrement diminué, mais on ne retrouve aucune tendance significative. La DVC est rarement supérieure à cinq jours, cependant elle est toujours au minimum de trois jours. De très longues VC seraient survenues au cours des années 1910, au cours des années 1950 et au cours du 21^e siècle. L'intensité maximale des VC (IVC) aurait diminué entre les années 1890 et 2020. En effet, on remarque que les tendances ont significativement diminué pour les seuils de 31°C et de 30°C. Ceci nous indique donc que l'intensité maximale en période de VC aurait diminué pour les seuils les plus conservateurs. De façon générale, l'intensité maximale des VC à Ottawa est de 4°C, mais elle a parfois atteint des maximums de 8°C supérieurs au seuil étudié.

La somme des journées chaudes annuelles (SJC), c'est-à-dire le nombre de journées individuelles dépassant le seuil, a aussi légèrement diminué ou du moins rester très stable pendant la période d'étude, puisqu'on ne retrouve aucune tendance significative. En générale, on peut dire qu'on retrouve un peu moins de 20 journées chaudes annuelles, mais lors de saison estivale de 1955, plus de 40 journées chaudes sont survenues. Au cours des années récentes près du double des journées chaudes sont survenues, c'est le cas pour l'année 2020. Enfin, pour le site d'Ottawa, les tendances concernant la date de la première VC annuelle, c'est-à-dire la précocité des vagues de chaleur (PVC), semblent assez stables

avec aucune tendance significative ni à la hausse ni à la baisse. Les tendances nous démontrent que la première VC survient généralement au mois de juillet.

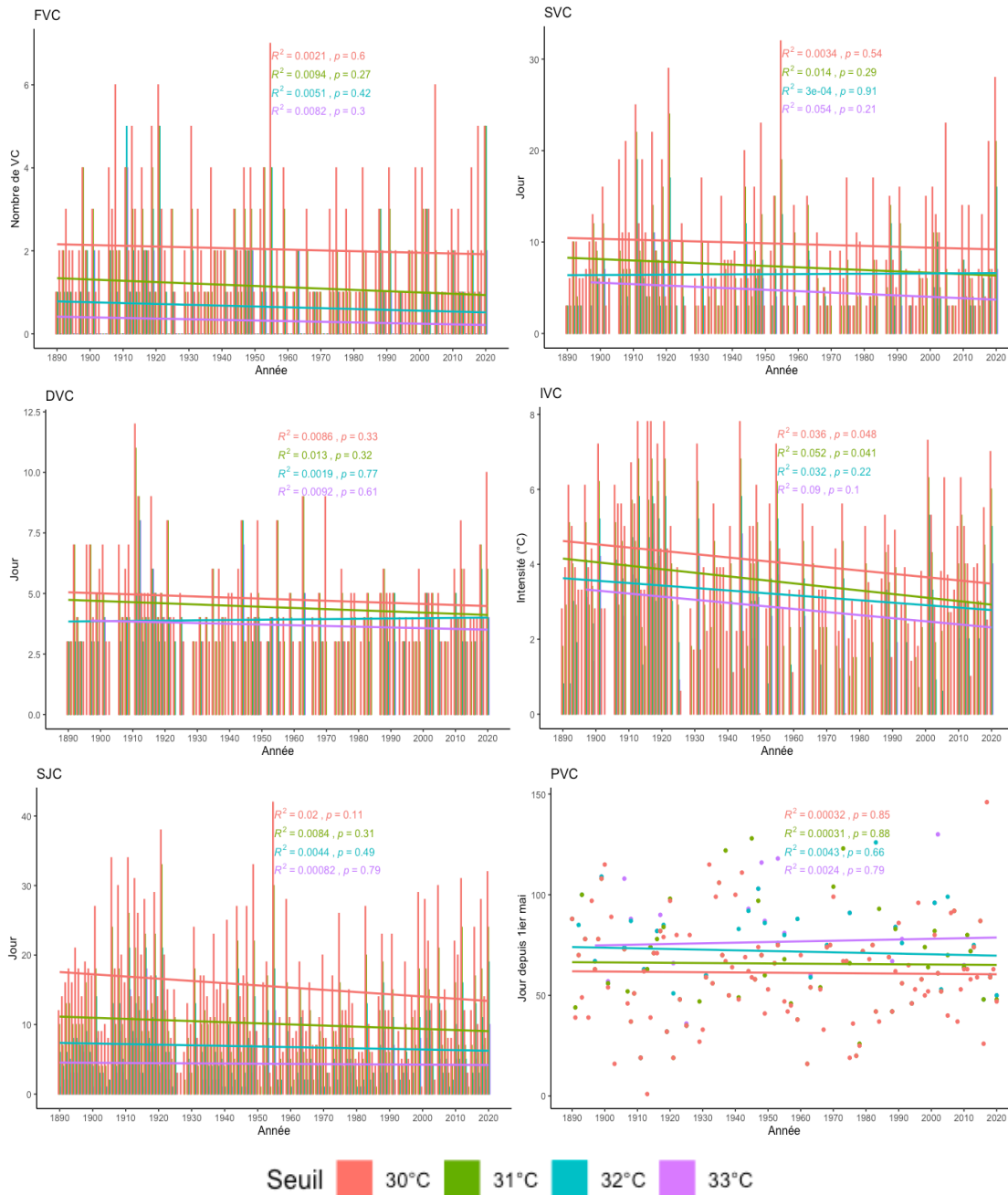


Figure 21. Caractéristiques des VC à Ottawa entre 1890 et 2020 selon les différents seuils de 33°C, 32°C, 31°C et 30°C.

4.4.2.2 Montréal

La FVC à Montréal semble avoir légèrement diminué depuis le début de la période d'enregistrement, mais on ne retrouve aucune tendance significative, et ce même selon les différents seuils. La région de Montréal enregistre habituellement moins deux VC par année selon un seuil conservateur de 30°C. Le nombre de VC enregistré est beaucoup plus faible, voire inexistant, pour les seuils plus élevés, tels que de 32°C et 33°C. Ceci nous indique donc que les périodes très chaudes de trois jours ou plus avec des températures maximales atteignant plus de 32°C sont très rares. Tout comme à Ottawa, en 1955 le record de FVC a été atteint avec sept VC enregistrés en un été selon le seuil de 30°C. Au niveau de la SVC, on remarque aussi que les tendances sont aussi légèrement à la baisse avec une tendance significative pour le seuil de 30°C. De façon générale, la région de Montréal enregistre un peu moins de 10 journées de VC par années selon un seuil de 30°C. Le maximum de journée de VC a été atteint en 1955, alors que 28 jours de VC ont été recensés.

Pour ce qui est de la DVC, les tendances sont ambiguës, pour certains seuils la tendance aurait légèrement augmenté alors que pour les autres seuils la tendance aurait diminué, mais on ne retrouve aucune tendance significative. La DVC est rarement supérieure à cinq jours, cependant elle est toujours au minimum de trois jours. De très longues VC seraient survenues au cours des années 1910, au cours des années 1950 et au cours du 21^e siècle. L'IVC est restée très stable à Montréal. De façon générale, l'intensité maximale des VC est entre 2° et 4°C, mais elle a parfois atteint des maximums de 7°C supérieurs au seuil étudié. La SJC est aussi restée très stable à Montréal pendant la période d'étude, puisqu'on ne retrouve aucune tendance significative. En générale, on peut dire qu'on retrouve une dizaine de journées chaudes annuellement, mais lors de saison estivale

de 1955, plus de 30 journées chaudes sont survenues. Enfin, pour le site de Montréal, les tendances concernant la PVC, semblent avoir significativement diminué pour les seuils de 32°C et 33°C. Les tendances nous démontrent que la date de la première VC survient généralement un peu plus tôt en saison. Les tendances pour les seuils plus bas de 30°C et 31°C sont stables.

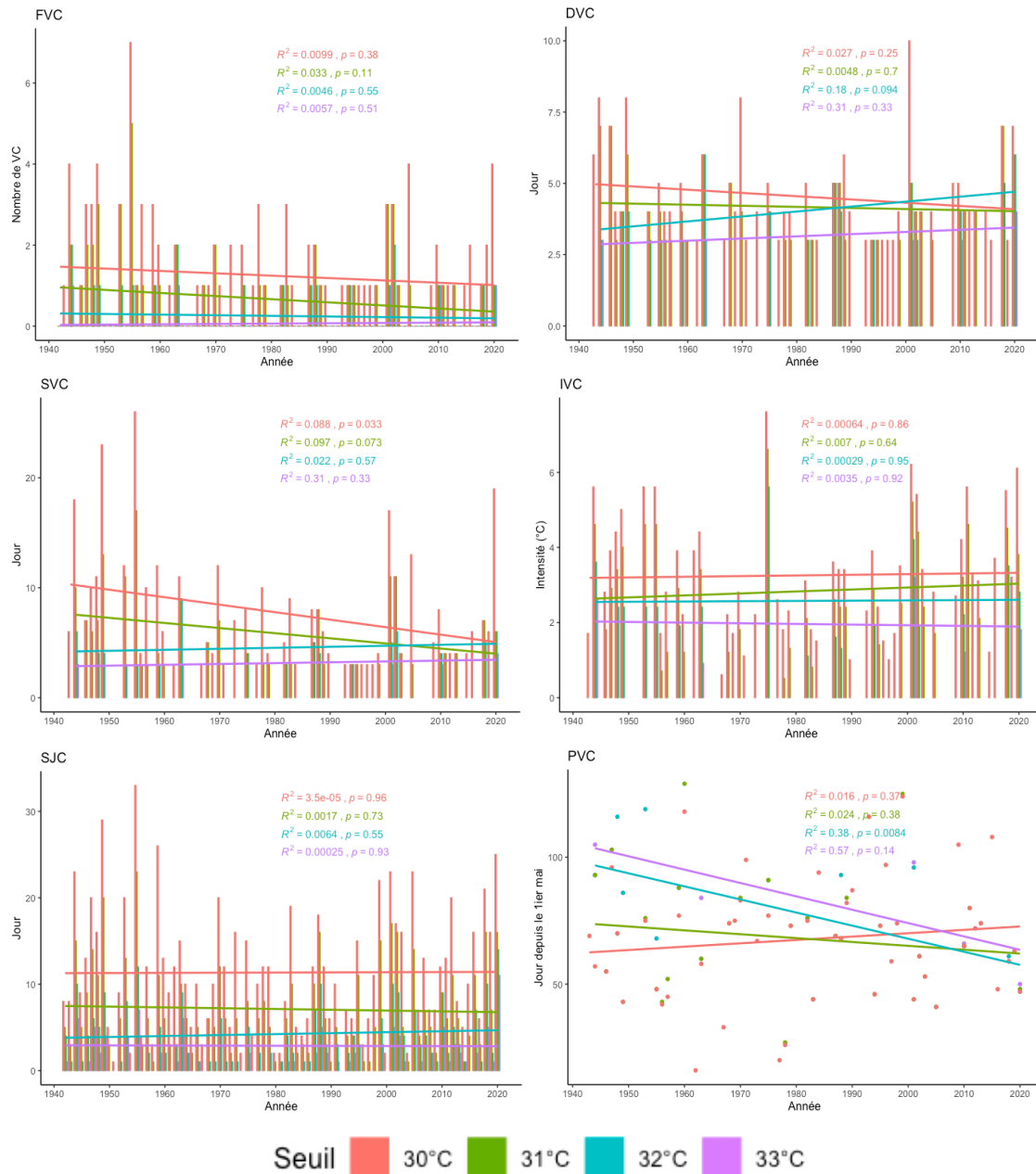


Figure 22. Caractéristiques des VC à Montréal entre 1941 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.

4.4.2.3 Toronto

La FVC à Toronto est stable depuis le début de la période d'enregistrement. La région de Toronto enregistre habituellement un peu moins de trois VC par année selon un seuil conservateur de 30°C, mais cette tendance est légèrement à la baisse. Le nombre de VC enregistré est beaucoup plus faible, voire inexistant, pour les seuils plus élevés, tel que de 32°C et 33°C. Ceci nous indique donc que les périodes très chaudes de trois jours ou plus avec des températures maximales atteignant plus de 32°C sont très rares. Au contraire des deux autres régions, c'est en 1959 que le record de FVC a été atteint à Toronto avec huit VC enregistrées en un été. Au niveau de la SVC, on remarque aussi que les tendances sont stables. De façon générale, la région de Toronto enregistre 10 journées de VC par années selon un seuil de 30°C. Le maximum de journée de VC a été atteint en 1959, alors que plus de 35 jours de VC ont été recensés.

Pour ce qui est de la DVC, les tendances sont encore une fois stables. La DVC est rarement supérieure à cinq jours. De très longues VC seraient survenues au cours des années 1950 et au cours du 21^e siècle. L'IVC a légèrement augmenté pour les seuils plus conservateurs de 30°C et 31°C, mais pas de façon significative. Au contraire, selon les seuils plus élevés, les tendances de l'intensité auraient plutôt diminué. De façon générale, l'intensité maximale des VC est entre 2° et 4°C, mais elle a parfois atteint des maximums de 7°C supérieurs au seuil étudié.

La SJC est restée très stable à Toronto pendant la période d'étude, puisqu'on ne retrouve aucune tendance significative. En générale, on peut dire qu'on retrouve une vingtaine de journées chaudes annuellement, mais lors de saison estivale de 1959, plus de 40 journées chaudes sont survenues. Enfin, pour le site de Toronto, les tendances de la

PVC n'ont pas changé depuis le début de la période d'analyse, les VC ne surviennent donc pas plus tôt en saison.

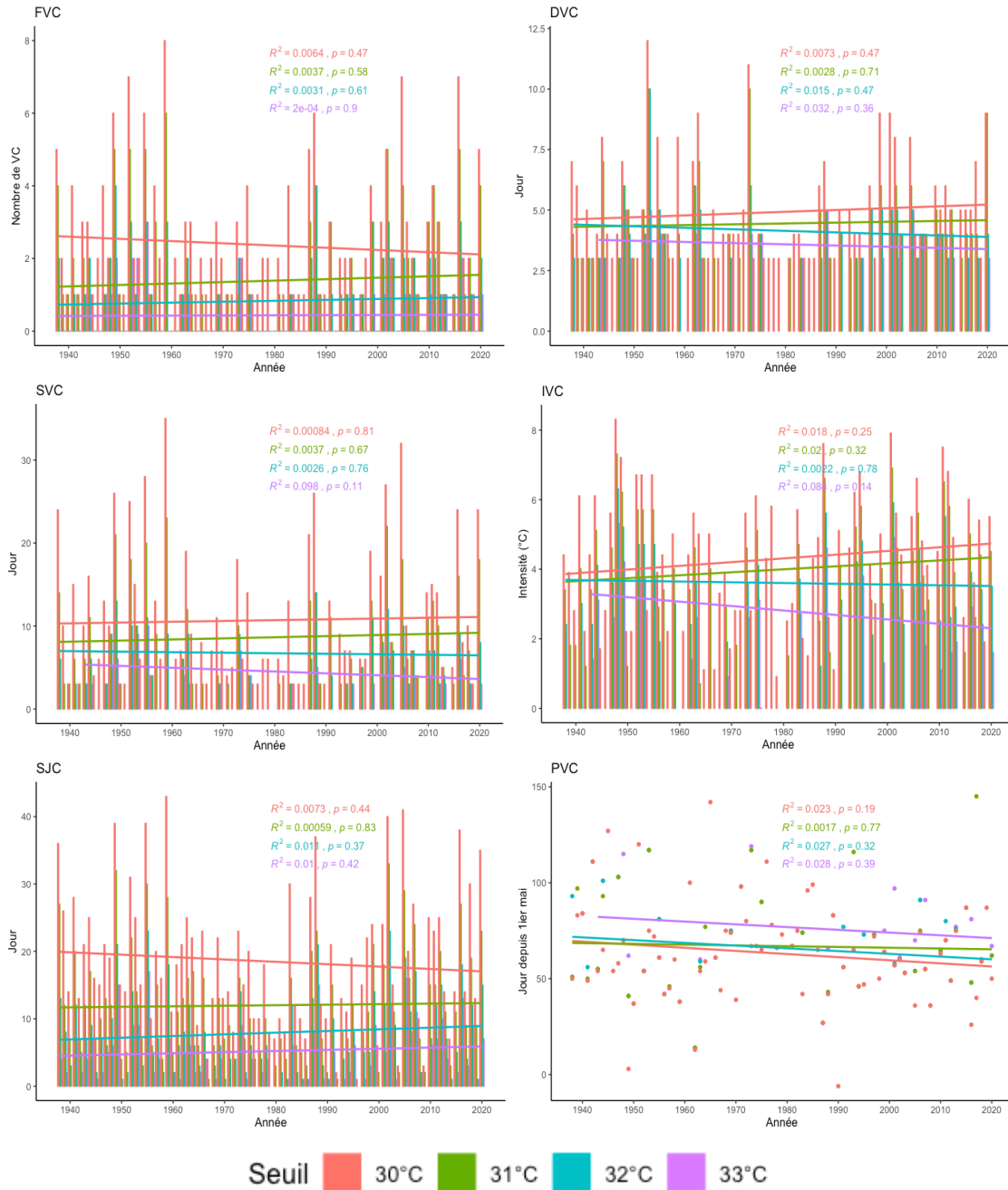
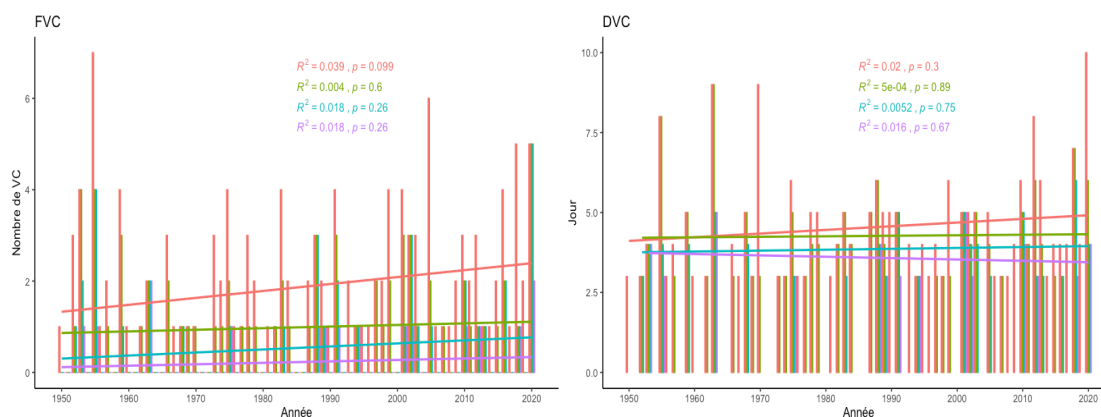


Figure 23. Caractéristiques des VC à Toronto entre 1937 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.

4.4.2.4 Analyses débutant en 1950

Les mêmes analyses ont été réalisées pour les trois RMR, mais selon une période d'étude plus courte, soit de 1950 à 2020, afin de voir si les tendances obtenues étaient différentes et si elles allaient refléter davantage avec ce qui est observé au niveau mondial. Ces analyses nous ont révélé que bien qu'on observe davantage de tendances à la hausse, encore peu de tendances sont significatives.

Pour la région d'Ottawa, on remarque entre autres que la FVC, l'IVC ainsi que la SJC ont légèrement augmenté entre 1950 et 2020, avec une seule tendance significative pour la SJC selon le seuil de 31°C. Bien que certains des caractérisés sont à la hausse, d'autres caractéristiques telles que la DVC et la SVC sont stables. Enfin, on remarque une diminution de la date de la première VC pour les seuils de 33°C et 32°C selon cette période d'étude.



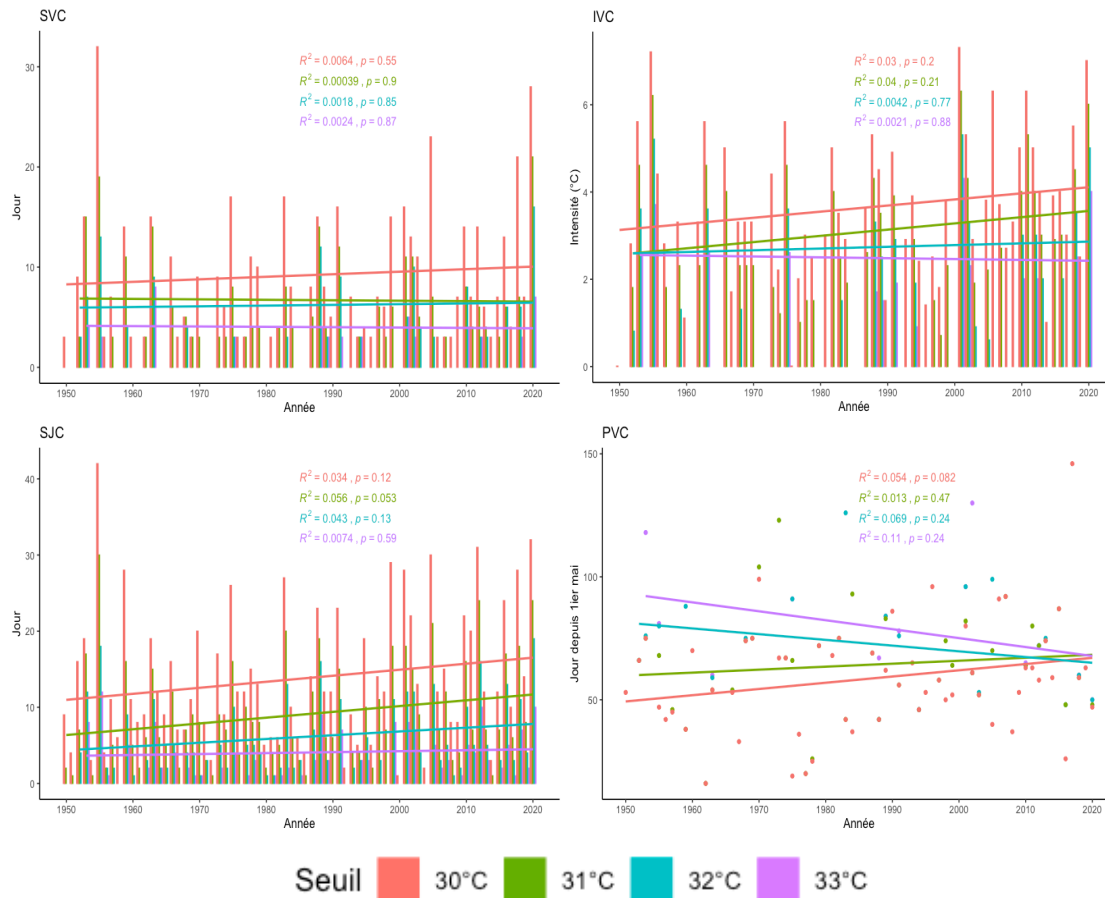


Figure 24. Caractéristiques des VC à Ottawa entre 1950 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.

Pour la région de Montréal, on remarque que la DVC, l'IVC ainsi que la SJC ont légèrement augmenté entre 1950 et 2020, mais on ne retrouve pas de tendance significative. D'autres caractéristiques telles que la FVC et la SVC sont stables ou, même légèrement vers la baisse. Enfin, on remarque ici une diminution de la date de la première VC pour les seuils de 33°C et 32°C ce qui correspond à ce qui a été observé pour la période d'étude complète de la station présentée plus haut.

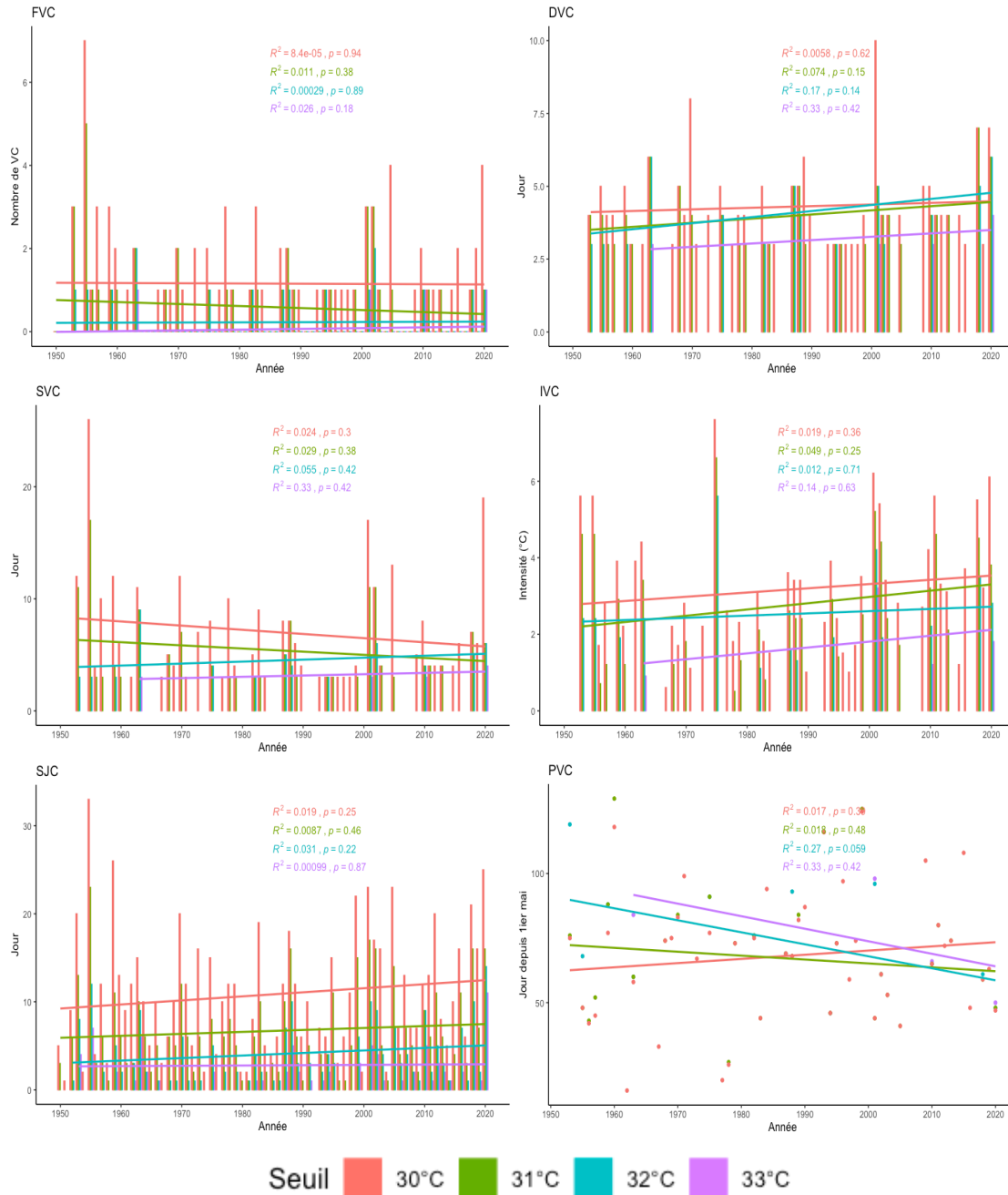


Figure 25. Caractéristiques des VC à Montréal entre 1950 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.

Pour la région de Toronto, on remarque des tendances stables pour la majorité des caractéristiques des VC. Effectivement, la FVC, SJC ainsi que la PVC connaissent peu de tendance entre 1950 et 2020. Au contraire, la DVC ainsi que la SVC auraient légèrement

diminué et pour certains des seuils la tendance est significative. Enfin, l'IVC a augmenté et ce de façon significative pour le seuil de 30°C.

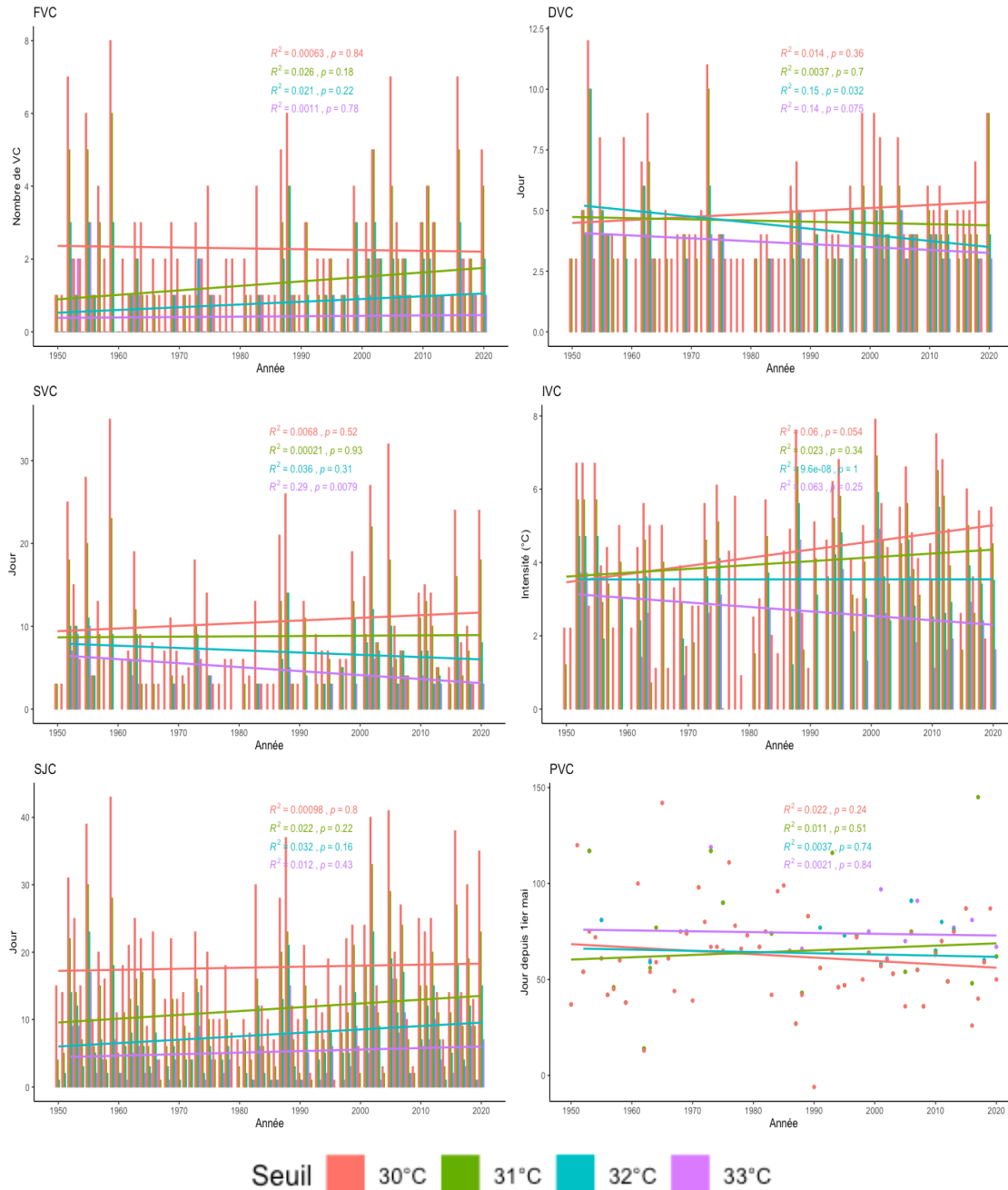
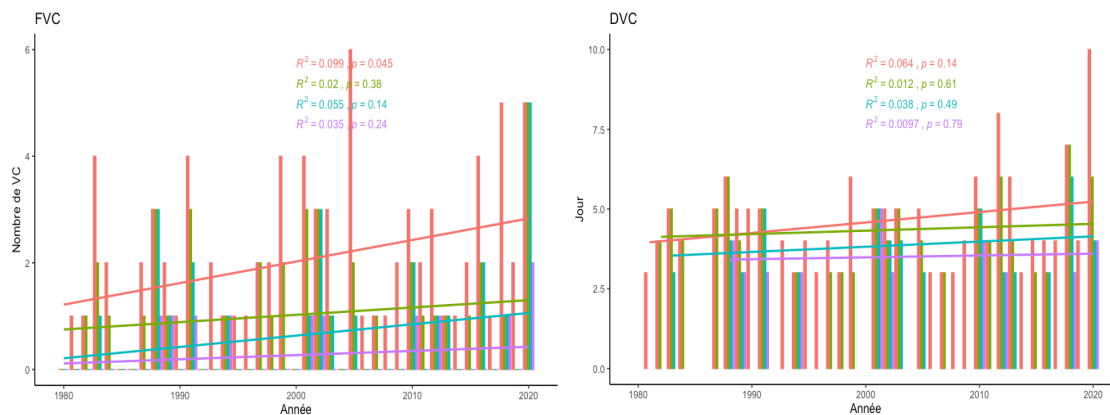


Figure 26. Caractéristiques des VC à Toronto entre 1950 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.

4.4.2.5 Analyses débutant en 1980

Encore une fois, les mêmes analyses ont été réalisées pour les trois RMR, mais selon une période d'étude encore plus courte, soit de 1980 à 2020. Entre les années 1980 et 2020, les tendances observées sont généralement à la hausse pour toutes les régions, et ce pour la majorité des seuils. De plus, on retrouve davantage de tendances significativement à la hausse pour chacune des régions. On peut donc dire que certaines caractéristiques des vagues de chaleur ont significativement augmenté depuis les années 1980. Ceci est probablement dû au fait que dans les années récentes les températures estivales sont considérablement plus élevées que lors des années 1980 alors qu'on observe des températures estivales généralement en dessous des normales.

Pour la région d'Ottawa, les tendances sont assez marquées vers la hausse, et particulièrement pour la FVC ainsi que la SJC qui aurait significativement augmenté entre les années 1980 et 2020 pour le seuil de 30°C. Les autres caractéristiques, telles que DVC, SVC et l'IVC, auraient aussi légèrement augmenté.



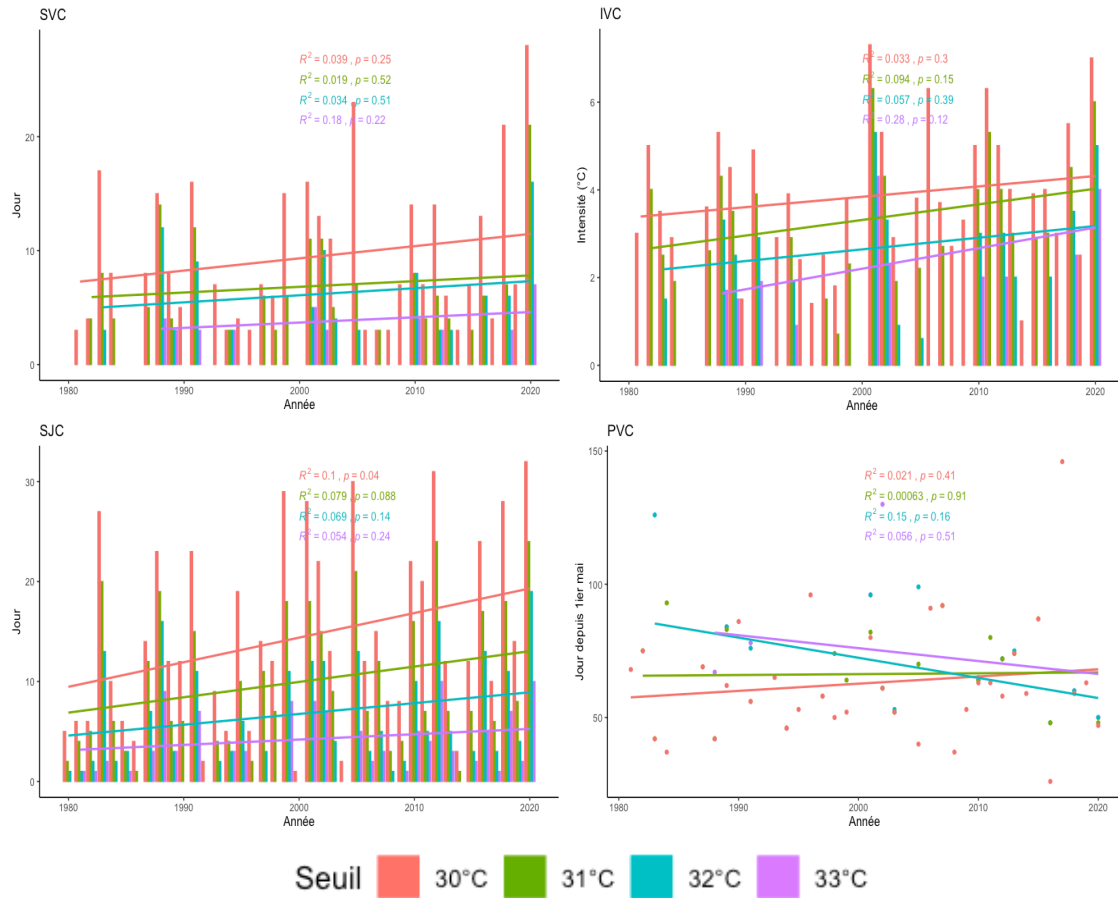
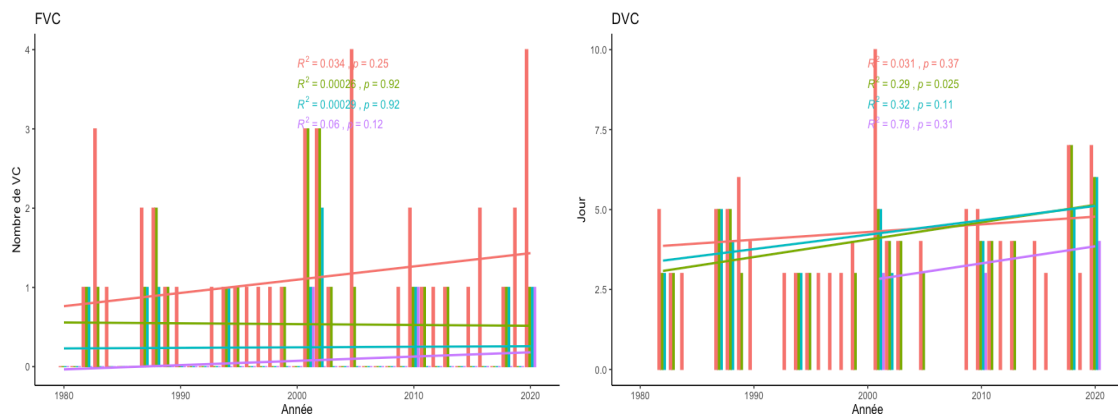


Figure 27. Caractéristiques des VC à Ottawa entre 1980 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.

Pour la région de Montréal, l'ensemble des tendances auraient augmenté. On remarque même plusieurs tendances significativement vers la hausse pour la DVC, l'IVC ainsi que pour la SJC. On peut donc dire que les tendances des VC à Montréal entre 1980 et 2020 ont significativement augmenté.



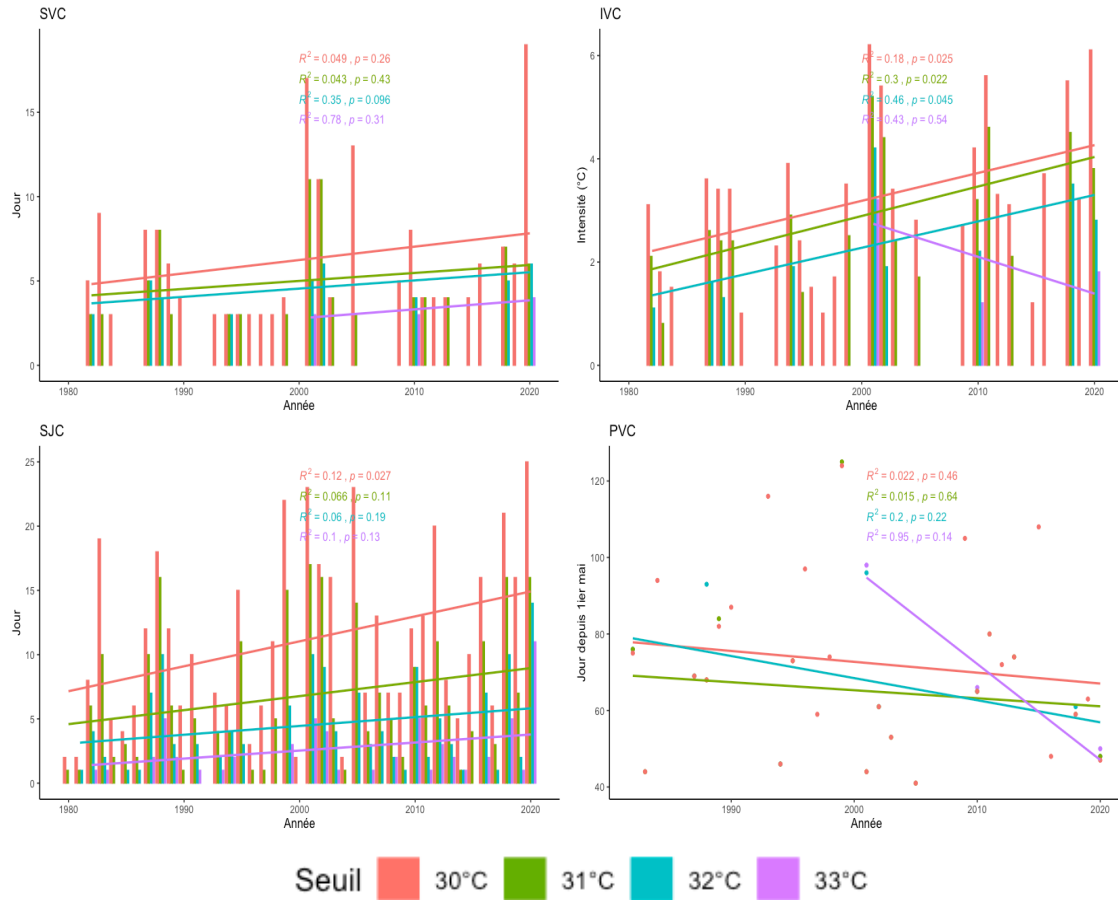
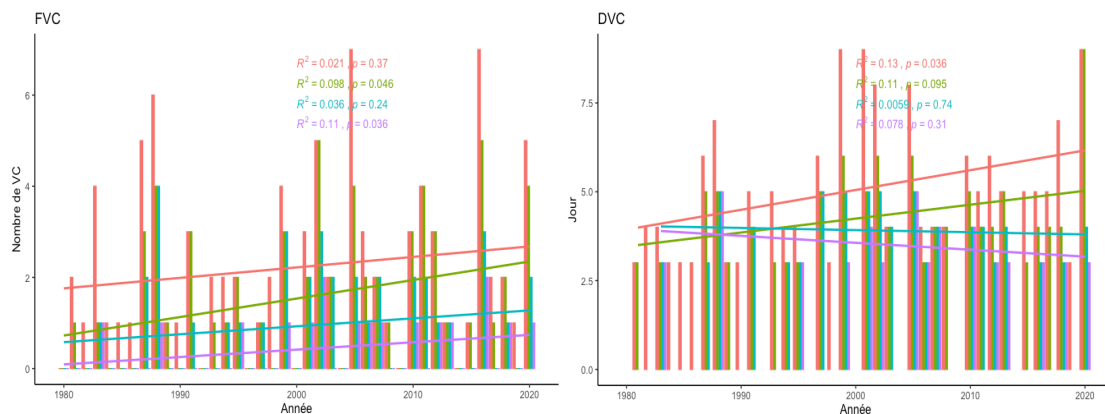


Figure 28. Caractéristiques des VC à Montréal entre 1980 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.

Pour la région de Toronto, l'ensemble des tendances auraient augmenté pour le seuil de 30°C et de 31°C avec certaines tendances significatives pour la DVC et SJC. Par contre, les tendances pour les seuils de 32°C et 33°C sont stables ou légèrement à la baisse. Enfin, la PVC serait restée très stable entre 1980 et 2020.



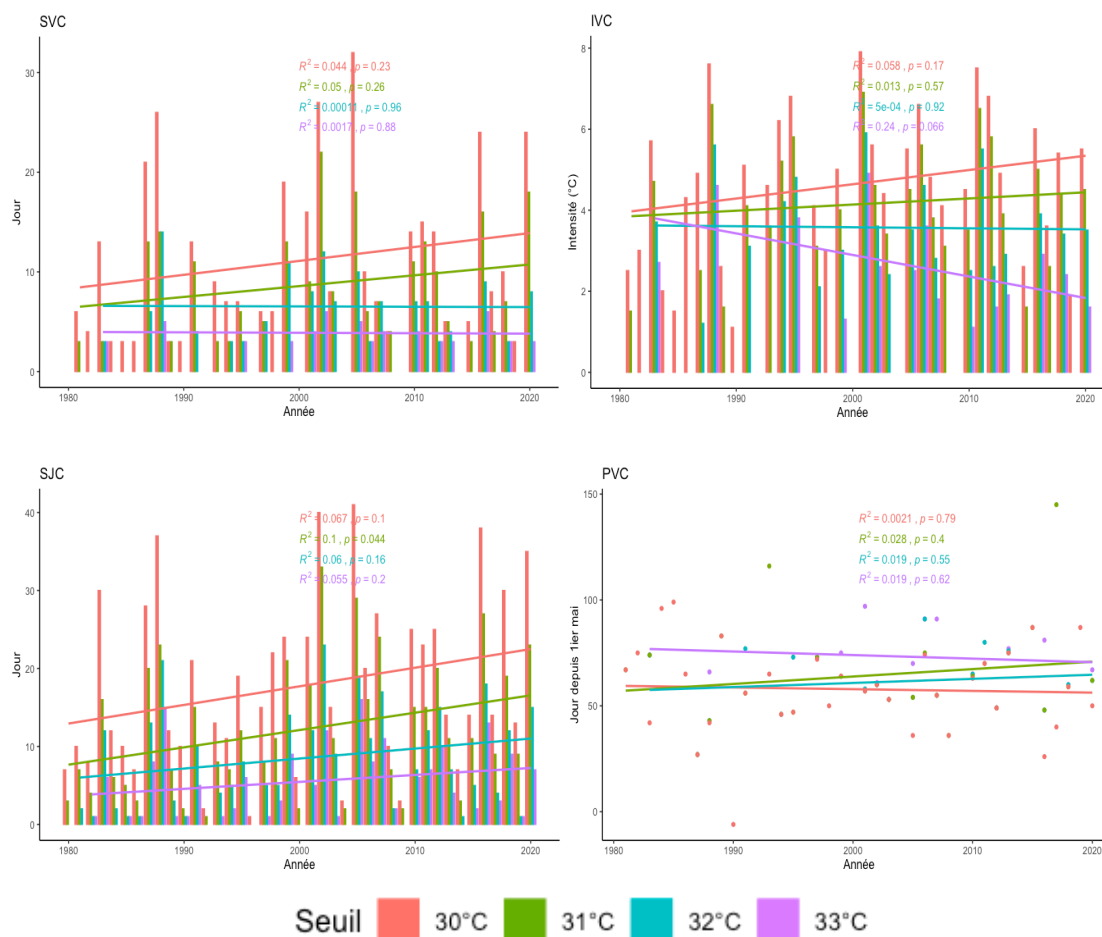


Figure 29. Caractéristiques des VC à Toronto entre 1980 et 2020 selon les différents seuils de 33°, 32°, 31° et 30°C.

4.4.3 Humidex et périodes de chaleur accablante

On remarque que l'Humidex moyen estival a augmenté à chacun des sites d'étude, mais on ne retrouve pas d'augmentation significative pour la période d'étude. Cependant, plusieurs des étés les plus humides se sont produits au cours du 21^e siècle, tel que pour l'année 2020, 2018, 2016, 2010, 2005 et 2002. Des étés très humides se sont également produits dans les années 50, soit en 1959, 1955 et 1953.

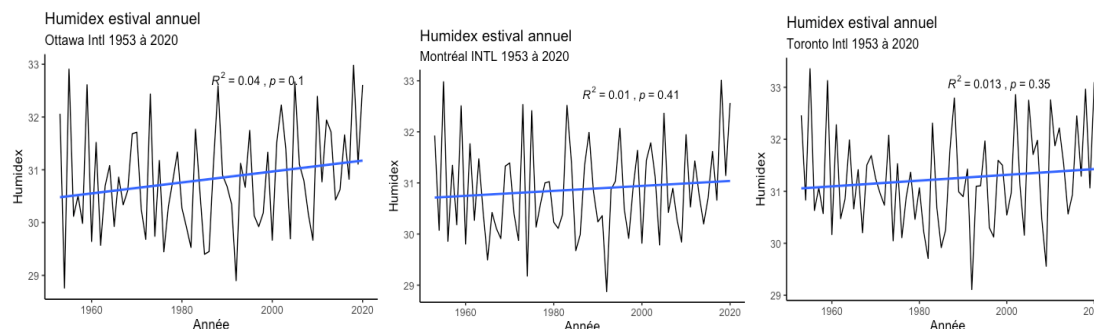


Figure 30. Humidex estival annuel moyen de 1953 à 2020.

Tableau 9. Les 10 étés les plus humides entre les années 1953 et 2020.

Ottawa		Montréal		Toronto	
Année	Humidex moyen	Année	Humidex moyen	Année	Humidex moyen
2018	33.0	2018	33.0	1955	33.4
1955	32.9	1955	33.0	1959	33.1
2005	32.7	2020	32.6	2020	33.1
1959	32.6	1973	32.5	2018	33.0
2020	32.6	1983	32.5	2002	32.9
1988	32.6	1959	32.5	1988	32.8
1973	32.4	1975	32.4	2010	32.8
2010	32.4	2005	32.4	2005	32.8
2002	32.2	1995	32.1	1953	32.5
1953	32.1	1988	32.0	2016	32.5

4.4.3.1 Ottawa – Gatineau

Au niveau des périodes de chaleur accablante (PCA), on remarque que, depuis le début des années 1950, il y a eu une augmentation au niveau de la fréquence des PCA (FPCA) à Ottawa-Gatineau et les tendances sont significatives pour la majorité des seuils. Les tendances pour la durée des PCA (DPCA) sont un peu plus ambiguës et on ne retrouve aucune tendance significative vers la hausse ou la baisse. Pour sa part, l'intensité maximale des PCA (IPCA) a augmenté de façon significative pour les seuils entre 35 et 36 d'Humidex. Enfin, le nombre de journées de chaleur accablante (SJCA) a significativement augmenté pour la majorité des seuils.

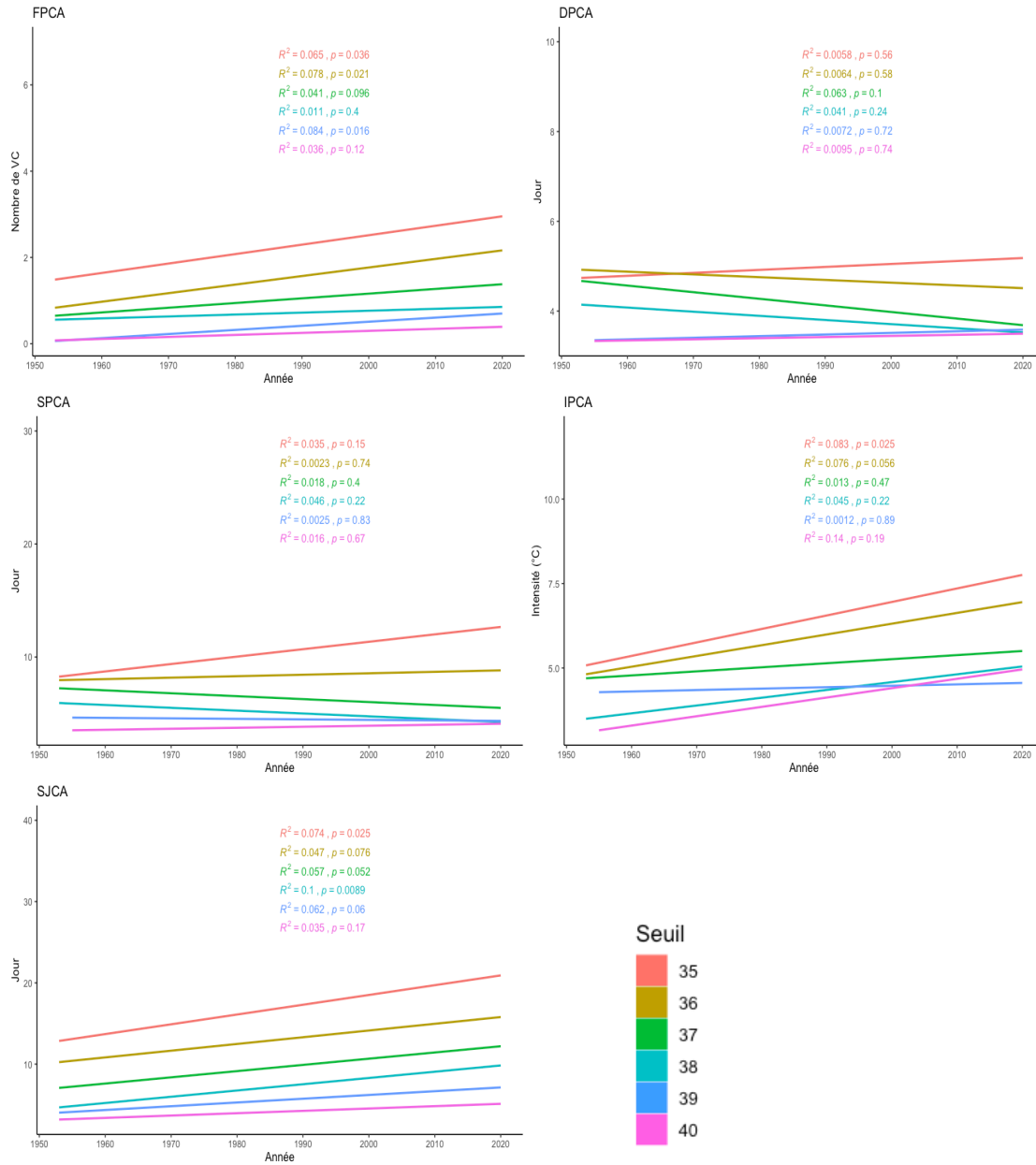


Figure 31. Caractéristiques des PCA à Ottawa entre les années 1953 et 2020.

4.4.3.2 Montréal

Dans la région de Montréal, les tendances observées ne sont pas similaires à la région d'Ottawa-Gatineau. On peut remarquer certaines tendances à la hausse et à la baisse, mais on ne retrouve pas de tendances significatives pour aucun des seuils. Les tendances des PCA à Montréal n'ont donc pas diminué ni augmenté depuis les années 1950.

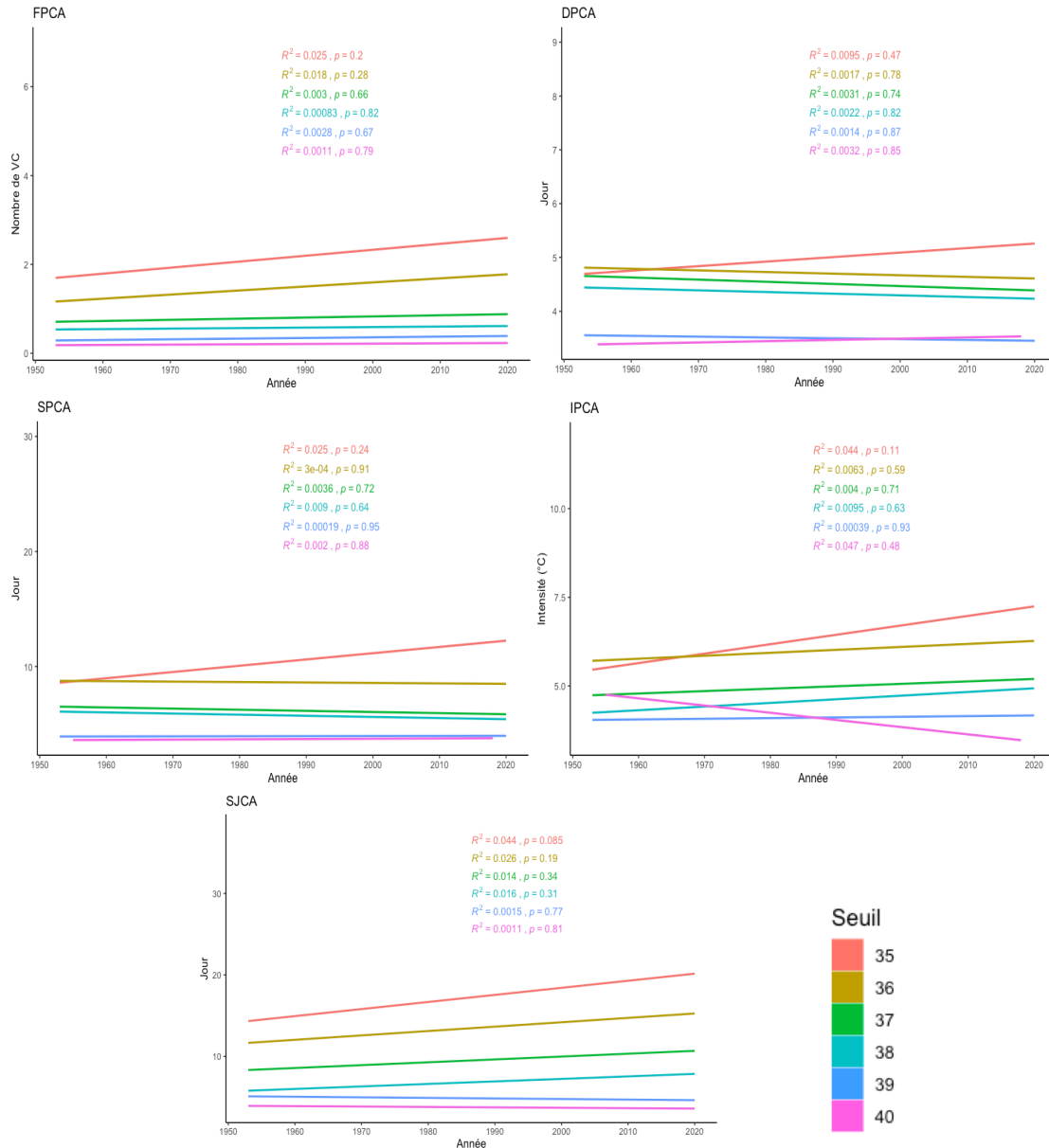


Figure 32. Caractéristiques des PCA à Montréal entre les années 1953 et 2020.

4.4.3.3 Toronto

Dans la région de Toronto, on remarque que la FPCA est significativement à la hausse pour les seuils plus bas (soit Humidex de 35 et 36). Au niveau de la DPCA, les tendances semblent avoir diminué entre les années 1950 et 2020. L’IPCA est légèrement à

la hausse, mais pas de façon significative. Enfin, la SJCA a augmenté pour l'ensemble des seuils, mais aucune tendance significative n'est observée.

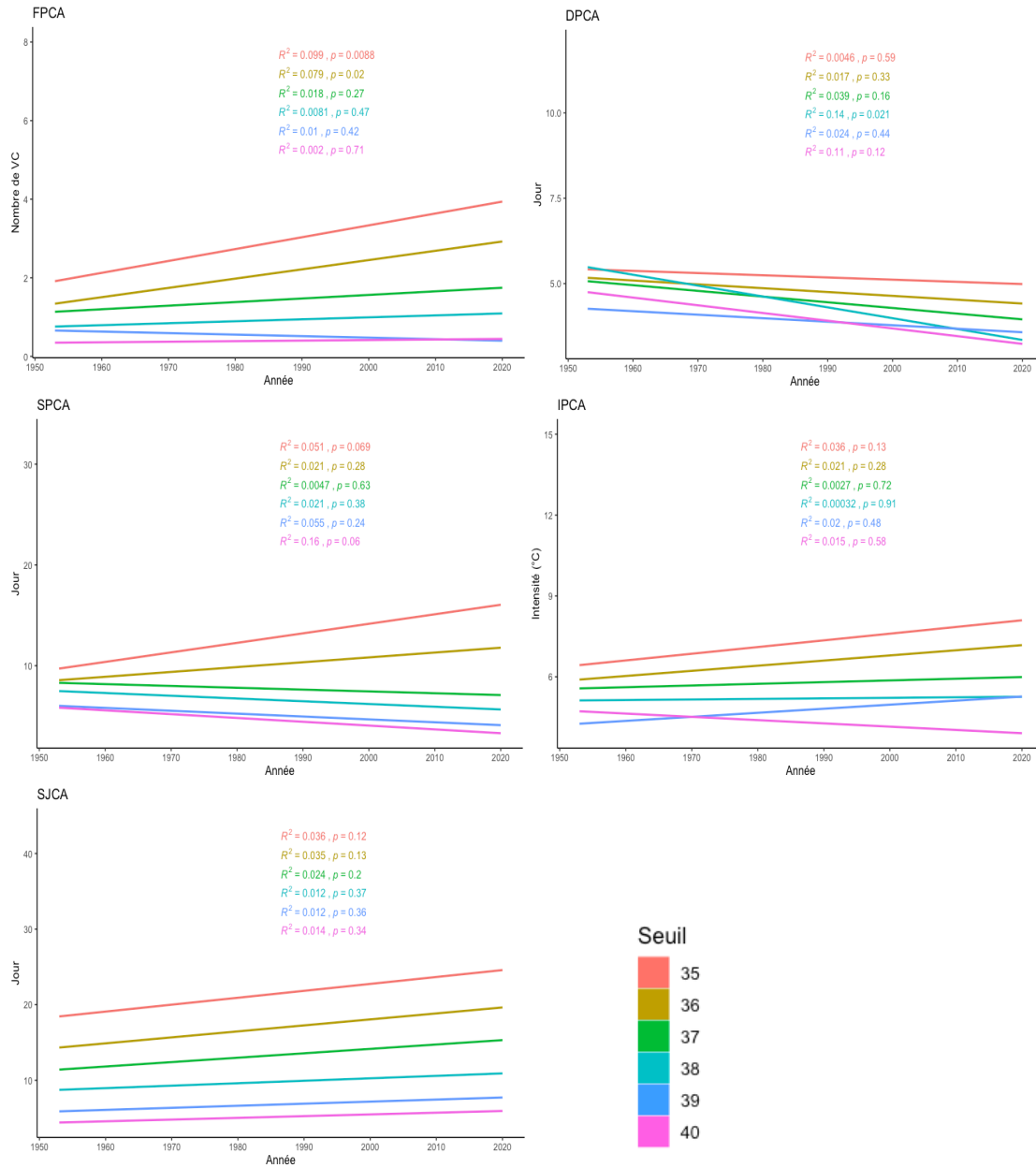


Figure 33. Caractéristiques des PCA à Toronto entre les années 1953 et 2020.

4.4.4 Effet de l'îlot de chaleur urbain

4.4.4.1 Chelsea

La ville de Chelsea est localisée dans le Parc de la Gatineau à proximité de la ville d'Ottawa. Ces analyses préliminaires entre les régions rurales et urbaines ont démontré que les tendances des vagues de chaleur observées à Chelsea sont différentes de celles d'Ottawa. Effectivement, on remarque que la majorité des caractéristiques des VC sont à la hausse au contraire de la région d'Ottawa. On remarque aussi que le nombre total de VC est moindre dans un environnement rural que dans un environnement urbain. Enfin, à Chelsea, il est possible d'observer la hausse graduelle des caractéristiques des VC, ce qui correspond davantage aux observations mondiales.

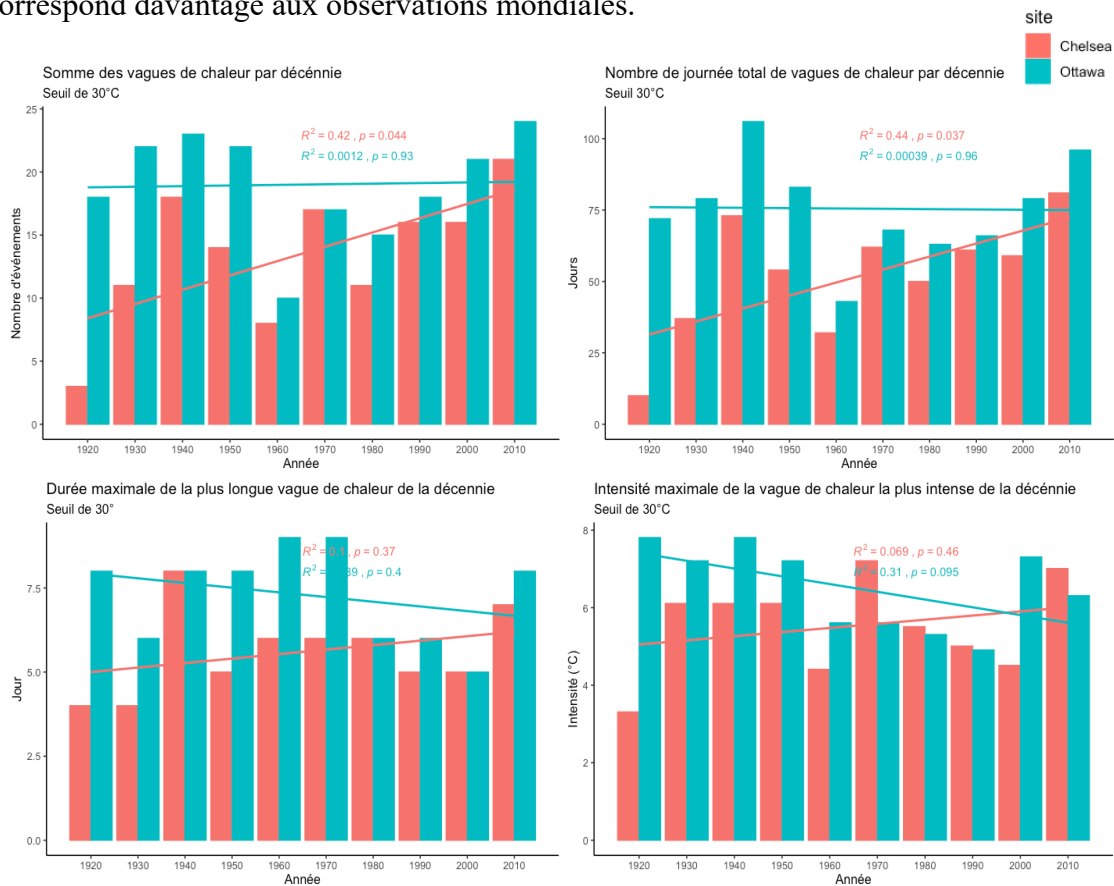


Figure 34. Comparaison de la somme des VC, du nombre de journées totales de VC, de la durée maximale de la plus longue VC et l'intensité maximale de la VC la plus intense par décennie entre Ottawa et Chelsea selon un seuil de 30°C.

4.4.4.2 Oka

La ville d’Oka est située complètement à l’extérieur de l’île de Montréal dans une région rurale. Au contraire de Chelsea, les tendances concernant les VC dans la région rurale d’Oka ne suivent pas les mêmes tendances. Effectivement, on remarque que les tendances sont significativement à la baisse et suivent de très près les variations observées dans la région de Montréal pour le seuil de 30°C. Également les chiffres des caractéristiques sont assez similaires, les caractéristiques des VC ne sont donc pas nécessairement plus intenses dans la région urbaine de Montréal.

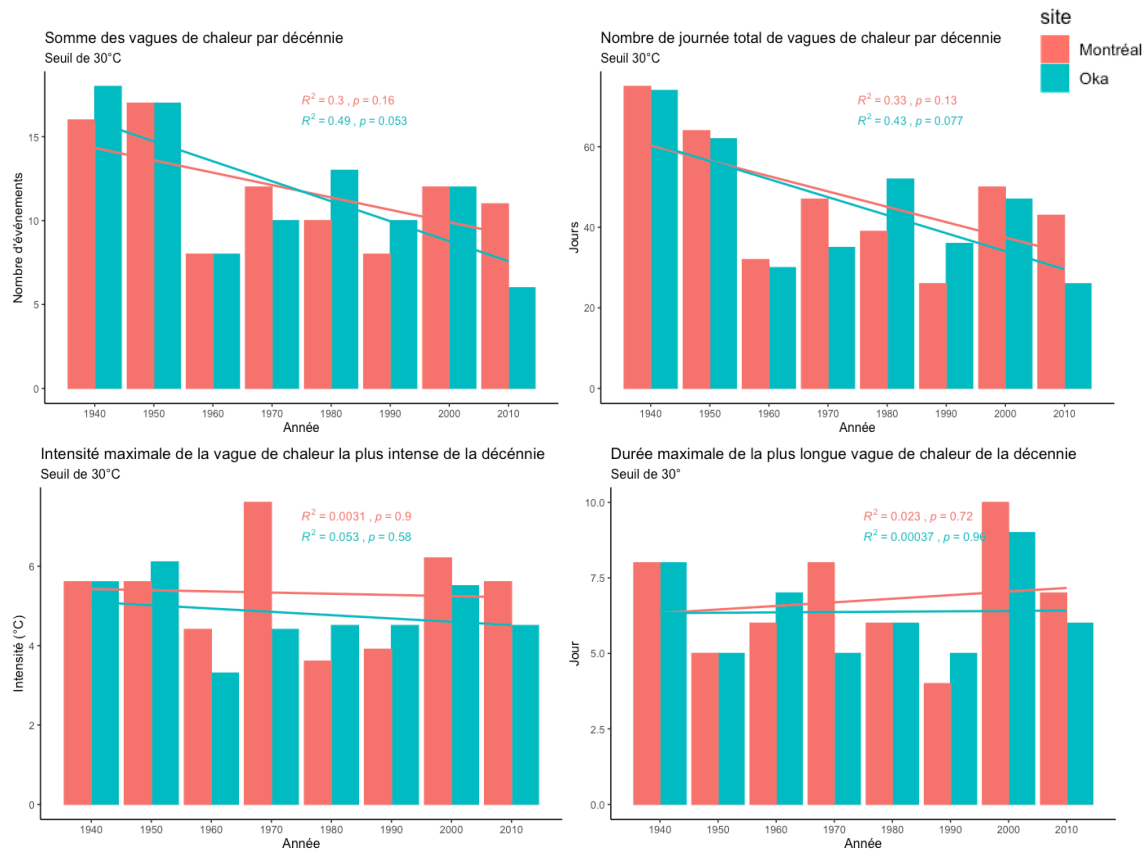


Figure 35. Comparaison de la somme des VC, du nombre de journées totales de VC, de la durée maximale de la plus longue VC et l’intensité maximale de la VC la plus intense par décennie entre Oka et Montréal selon un seuil de 30°C.

4.5 Discussion

4.5.1 *Vagues de chaleur*

Au cours du 20^e siècle, les températures moyennes ont significativement augmenté dû au réchauffement planétaire et le tout aurait causé une augmentation de la fréquence, intensité, durée et précocité des VC un peu partout sur le globe (GIEC, 2021). Or, selon les résultats de notre étude, malgré la hausse des températures estivales canadiennes, les caractéristiques des VC dans les RMR étudiées ne se sont pas amplifiées de façon significative, et ce même selon les différents seuils analysés. Notre thèse présente donc un résultat nul, puisqu'il ne semble pas y avoir des tendances temporelles substantielles à la hausse dans nos sites d'étude pour la période d'étude couverte.

Premièrement, la FVC n'a pas augmenté durant la période d'étude dans nos RMR. La FVC semble même avoir légèrement diminué à Ottawa-Gatineau et à Montréal, alors que la tendance est stable à Toronto. Pourtant, selon les études réalisées ailleurs, c'est la caractéristique des VC qui aurait augmenté le plus rapidement et de façon plus significative (GIEC, 2021; Perkins-Kirkpatrick & Gibson, 2017; Perkins et al., 2012). En effet, aux États-Unis, la FVC auraient augmenté de façon significative dans 46 des 50 régions métropolitaines étudiées depuis les années 1960 (Habeeb et al., 2015). De plus, selon le GIEC, en Amérique du Nord on devrait observer une augmentation significative de la FVC, or il existe encore beaucoup de variabilité spatiale et saisonnière dans cette région du globe ce qui pourrait expliquer les résultats obtenus (GIEC, 2021).

Deuxièmement, la DVC n'a pas augmenté dans nos régions d'étude. Pour la période d'analyse, elle aurait même diminué pour certains des seuils. Par contre, ailleurs dans le monde, des tendances significatives au niveau de la durée ont seulement été observées dans

des sections limitées du globe (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). Effectivement, les tendances à la hausse au niveau de la DVC seraient seulement significatives pour l'Amérique du Sud, le sud de l'Amérique du Nord, l'Afrique, la Moyen-Orient et l'Asie. De plus, la majorité des tendances à la hausse pour la DVC ont été observé dans les basses latitudes (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). Par exemple, aux États-Unis, entre 1960 et 2010, la durée des VC auraient augmenté de 1 journée pour cette période (Habeeb et al., 2015). Dans le cadre d'une analyse des VC, il est important d'étudier la durée de celle-ci, puisque les périodes de chaleur soutenues ont des impacts beaucoup plus importants que les journées très chaudes uniques. Plus la DVC est longue plus les impacts risquent d'être dévastateur (Tebaldi & Wehner, 2018). Au niveau de la SVC, nous observons des tendances légèrement à la baisse pour l'ensemble des régions, ce qui correspondent aux tendances de la FVC et de la DVC. Ceci est logique puisque, si la FVC et la DVC avaient augmenté de façon significative, la SVC aurait augmenté de façon proportionnelle (GIEC, 2021).

Troisièmement, l'IVC dans nos RMR serait très stables et même parfois à la baisse de façon significative pour certains des seuils. Ceci est tout de même surprenant et ne suit pas ce qui serait observé ailleurs sur le globe (GIEC, 2021). En effet, malgré le fait que les tendances significatives à la hausse de l'IVC restent faibles et limitées à certaines régions, peu d'étude mentionne que l'intensité aurait diminué. Encore une fois la majorité des tendances significatives à la hausse au niveau de l'IVC auraient été observées dans les basses latitudes (GIEC, 2021; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). Entre autre, il a été possible de démontrer qu'aux États-Unis, l'IVC auraient augmenté d'environ 0.1°C par décennie depuis 1960 ans dans les métropoles les plus importantes (Habeeb et al., 2015).

D'autres études mentionnent que l'intensité maximale en période de VC aurait augmenté jusqu'à 1°C par décennie (Perkins et al., 2012).

Quatrièmement, la PVC est assez stable avec aucune tendance significative ni à la hausse ni à la baisse pour Ottawa et Toronto. Or à Montréal, on observe des tendances significatives à la baisse démontrant que les vagues de chaleur surviennent plus tôt en saison. Ceci suit ce qui est expérimenté ailleurs en Amérique du Nord, soit que la première VC survient plus tôt en saison (Lyon & Barnston, 2017). La date de la première VC a été étudiée dans le cadre de cette recherche puisque plus elle se produit en début de saison, moins la population est acclimatée aux températures intensément chaudes et donc les répercussions de santé peuvent être plus importants (Anderson & Bell, 2011; Smoyer *et al.*, 2000). Bref, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ne correspondent pas exactement à ce qui peut être observé ailleurs sur le globe, cependant plusieurs raisons permettent d'expliquer le tout, soit la localisation géographique, la période d'étude ainsi que la définition utilisée.

Bien que le Canada ait connu une augmentation significative des températures moyennes annuelles et que le réchauffement planétaire soit plus intense dans les hautes latitudes, les répercussions des événements extrêmes ne se traduisent pas de la même manière sur tous les continents. En Amérique du Nord, il est possible d'observer beaucoup de variabilité régionale et saisonnière, ce qui permet d'expliquer en partie les résultats obtenus. Le climat et la topographie régionale peuvent également jouer un rôle dans le développement des événements de chaleur extrême. Par exemple, pour le site de Toronto, l'influence des Grands Lacs peut avoir eu un impact sur l'intensité des événements de chaleur enregistrée. Les grandes étendues d'eau situées à proximité de cette grande ville

permettent potentiellement de tempérer les extrêmes de chaleur. À Ottawa, les caractéristiques des VC semblent plus intenses et varient davantage selon le seuil utilisé et la période d'analyse. La vallée de l'Outaouais a peut-être comme conséquences d'emmagasiner la chaleur et de conserver des conditions chaudes et humides. Enfin, à Montréal comme à Toronto, la ville est entourée de cours d'eau, ce qui peut aussi aider à tempérer les extrêmes chauds expérimentés en périodes de VC.

Aussi, il est important de mentionner que la majorité des études réalisées à l'étranger ont débuté leur période d'analyse en 1950, ce qui peut avoir une influence sur les résultats obtenus. Effectivement, nous avons pu remarquer que selon les différentes périodes d'études (1900 à 2020, 1950 à 2020 et 1980 à 2020) les tendances sont différentes. Les tendances avec la période d'étude débutant au début du 20^e siècle sont généralement très stables. On retrouve très peu de tendances significativement à la hausse ou à la baisse. Ceci est dû au fait qu'il existe une très grande variabilité d'année en année et que certaines décennies (1920-1940 et 1990-2020) plutôt chaudes contre balancent les décennies en dessous des normales (1970-1990). On observe donc des tendances historiques à long terme très stables. Au contraire, les études internationales débutent généralement leurs analyses au cours des années 1950 ou encore des années 1980. Les tendances observées sont donc différentes puisqu'on élimine la période chaude expérimentée pendant le Dust Bowl en Amérique du Nord. Nos résultats pour les études débutant en 1950 ou en 1980 démontrent une augmentation plus marquée des caractéristiques des VC dans notre région, ce qui correspond davantage aux tendances mondiales.

Enfin, comme nous avons pu l'observer dans nos résultats, la définition du phénomène employée influence également les conclusions. Il existe beaucoup de

variabilité au niveau des résultats obtenus selon les différents seuils sélectionnés. Ceci nous démontre donc que la définition choisie peut influencer les résultats obtenus. Comme mentionner précédemment, il n'existe pas de définition universelle, ce qui limite la comparaison entre les études (Clark et al., 2006; Sanderson et al., 2017). Également la majorité des seuils employés au Canada ont été développés suite aux analyses sur la mortalité en période de VC et ne sont donc pas nécessairement applicables aux analyses climatologiques. La diversité régionale ainsi que la variété de définitions pour définir les vagues de chaleur demeurent pour l'instant une barrière importante à l'analyse des VC et des PCA puisqu'il est très ardu de tirer des conclusions fiables. Ceci nous mène également à se questionner sur la fiabilité des études réalisées à grande échelle où une définition ou seuil ont été utilisés pour analyser les tendances des VC sur des grands espaces géographiques.

Bref, les VC sont un phénomène extrême très complexe et, malgré l'augmentation significative des températures moyennes, il reste encore très ardu de démontrer des tendances significatives à la hausse du phénomène au Canada. Ceci nous indique donc que les VC ne sont pas seulement influencées par le réchauffement du climat. Plusieurs autres variables externes et internes pourraient les influencer, telles que la variabilité solaire, le volcanisme, El Niño et les différentes oscillations atmosphériques et océaniques.

4.5.2 *Humidex*

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes également intéressés à analyser les tendances des PCA. Selon les études réalisées à l'internationale, certaines régions du globe ont connu une augmentation de l'humidité dans l'air, ce qui peut augmenter substantiellement les températures ressenties en période de VC (Basara et al., 2010; Dahl

et al., 2019; Delworth et al., 1999; FMEQ, 2019). Dans notre région d'étude, l'Humidex moyen estival a augmenté, mais pas de façon significative. Pour sa part, la fréquence des PCA a pourtant augmenté de façon significative, de même, que l'intensité maximale des PCA dans certaines des régions. Or, pour ce qui est de la durée maximale et totale, les tendances sont assez ambiguës et très variables selon le seuil et la région. Le nombre de journées accablantes totales aurait aussi augmenté de façon significative. Ceci signifie donc que les périodes chaudes et humides surviennent plus fréquemment dans notre région d'étude et ceci peut donner l'impression que les extrêmes chauds sont plus récurrents.

4.5.3 *Effet de l'îlot de chaleur urbain*

Nos analyses préliminaires des caractéristiques des VC dans les milieux ruraux ont permis de démontrer que les tendances des VC ont augmenté pour Chelsea, mais pas pour Oka. Les tendances des VC à Chelsea sont très différentes et ne suivent pas les tendances observées dans la région d'Ottawa. Au contraire, les tendances des VC observées dans la région d'Oka sont assez similaires aux tendances observées dans la grande ville de Montréal. Ceci nous démontre donc que les tendances observées entre les régions rurales et urbaines ne se suivent pas nécessairement de régions en régions. Par contre, il est difficile d'expliquer pourquoi les tendances sont devenues plus élevées avec le temps à Chelsea. Le phénomène de l'étalement urbain pourrait en partie expliquer les événements de chaleur qui sont devenus plus importants avec le temps dans la région rurale de Chelsea. Il est possible que la grande ville d'Ottawa se soit suffisamment développée avec le temps et aurait pu influencer graduellement le climat de cette région qui était autrefois très rurale. Une autre explication pourrait simplement être que la station de Chelsea est défectueuse ou est devenue trop sensible avec le temps.

4.6 Conclusion

En conclusion, dans le contexte du réchauffement planétaire contemporain, nous démontrons que, dans les RMR du sud-est du Canada et pour la période d'étude, les tendances de VC ne présentent pas d'augmentation significative, et ce même selon une gamme de seuils. **Ceci infirme alors notre hypothèse de départ soit que les VC des trois RMR sont devenues plus fréquentes, intenses, longues et précoces que par le passé.** Effectivement, notre thèse démontre plutôt que des tendances observées durant le dernier siècle demeurent stables. Cependant, au cours des dernières décennies et plus particulièrement depuis 1980, on peut dire que les caractéristiques des vagues de chaleur ont légèrement augmenté, mais pas toutes de façon significative.

Deuxièmement, notre étude démontre que, malgré une augmentation non significative des températures ressenties en période estivale, les PCA ont augmenté, et ce parfois de façon significative selon les régions et les seuils observés. Le tout démontre donc que les périodes chaudes et humides surviennent davantage et sont plus intenses depuis le milieu du 20^e siècle. Enfin, les analyses des tendances des différentes caractéristiques des VC dans les rurales nous démontrent que certaines régions à l'extérieur de la ville connaissent une amplification des composantes des VC, mais il reste toujours à expliquer ce phénomène. Bref, cette étude nous prouve une fois de plus que les événements de chaleur extrême, tels que les VC, sont difficiles à étudier et qu'il est ardu de tirer des conclusions robustes quant aux tendances des caractéristiques des VC puisque la définition, la période d'étude et le lieu sont des variables importantes à prendre en considération dans ce type d'analyse.

Chapitre 5 Sommaire, limitations et considérations futures

5.1 Sommaire des résultats

Au niveau des tendances du climat général pour nos régions d'étude, il est possible d'observer:

- Une augmentation significative des températures moyennes annuelles au cours du dernier siècle;
- Une augmentation significative des températures moyennes estivales, mais les tendances sont moins marquées que pour les températures moyennes annuelles;
- Une augmentation significative des températures moyennes minimales estivales;
- Une augmentation non significative des températures moyennes maximales estivales;
- Une augmentation non significative des précipitations estivales.

Au niveau des tendances générales des VC pour nos régions d'étude, il est possible d'observer :

- Une légère diminution de la fréquence des VC à Ottawa ainsi qu'à Montréal et des tendances stables à Toronto;
- Une légère diminution de la durée maximale des VC aux trois sites d'étude;
- Une légère diminution de la somme des journées participant aux VC aux trois sites d'étude;
- Une diminution significative de l'intensité maximale à Ottawa selon certains seuils et des tendances légèrement vers la baisse pour Montréal et Toronto;
- Une tendance stable de la somme des journées chaudes annuelles aux trois sites d'étude;
- Une tendance significative à la baisse de la date de la première VC annuelle à Montréal, signifiant que les VC subviennent plus tôt en saison. On retrouve des tendances stables pour Ottawa et Toronto.

Au niveau des tendances de l'Humidex et des PCA pour nos régions d'étude, il est possible d'observer :

- Une augmentation non significative de l'Humidex estival moyen;
- Une augmentation significative de la fréquence des PCA à Ottawa et Toronto pour pratiquement tous les seuils;
- Une augmentation significative de l'intensité des PCA à Ottawa, mais des tendances stables pour Montréal et Toronto;
- Une augmentation marquée du nombre de journées de chaleur accablante aux trois sites d'études.

Au niveau des tendances des VC dans nos régions rurales, il est possible d'observer :

- Des tendances à la hausse pour les caractéristiques des VC dans la région rurale de Chelsea, ce qui est contraire aux tendances des VC observées dans la ville d'Ottawa;
- Des tendances à la baisse des caractéristiques des VC dans la région rurale d'Oka, ce qui suit les tendances des VC observées dans la ville de Montréal.

En résumé, dans le contexte du réchauffement planétaire contemporain, nous démontrons que, dans les RMR du sud-est du Canada, les tendances des VC ne présentent pas d'augmentation significative, et ce même selon une gamme de seuils. **Ceci infirme alors notre hypothèse de départ soit que les VC des trois RMR sont devenues plus fréquentes, intenses, longues et précoces que par le passé.** Notre thèse présente plutôt un résultat nul puisqu'il ne semble pas y avoir des tendances temporelles substantielles à la hausse dans nos sites d'étude pour la période d'analyse couverte. Par contre, nous démontrons que, malgré une augmentation non significative de l'Humidex estival moyen, les PCA ont significativement augmenté pour certaines des caractéristiques et certaines des régions. Le tout démontre donc que les périodes chaudes et humides surviennent davantage et sont plus intenses depuis le milieu du 20^e siècle.

5.2 Discussion

Les résultats de notre étude présentent une contribution à l'avancement des connaissances des périodes chaudes estivales dans nos RMR d'étude puisque cette thèse présente un résultat nul, alors que la majorité des sources médiatiques semblent présumées qu'avec le réchauffement climatique s'en suit automatiquement une hausse marquée des événements de chaleur extrême. Pourtant on oublie souvent que des périodes extrêmement chaudes ont également été recensées au Canada au cours des années passées, comme par exemple au cours des années 1920 et 1950 (McLeman, 2006; Philips, 2013; Raymond,

2020; Smoyer-Tomic et al., 2003). Malgré tout, nos résultats demeurent quelques peu surprenants puisqu'ils ne correspondent pas à ce qui est observée ailleurs dans le monde (Basara et al., 2010; Clark et al., 2006; FMEQ, 2019; GIEC, 2021; Habeeb et al., 2015; Herring et al., 2019; Mazdiyasi et al., 2019; Mazdiyasi & AghaKouchak, 2015; Oudin Åström et al., 2011; Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Smith et al., 2013). Par contre, comme mentionnée dans le dernier rapport publié par le GIEC, nos RMR font partie des régions exceptionnelles du globe où il n'aurait pas été possible d'observer une augmentation des extrêmes chauds. Effectivement, comme présenté à la figure 36, il est possible d'observer une hausse des extrêmes chauds pratiquement partout au monde, sauf pour notre région d'étude (ENA – East Nord America) (GIEC, 2021). Le tout correspond donc aux tendances que nous avons pu démontrer.

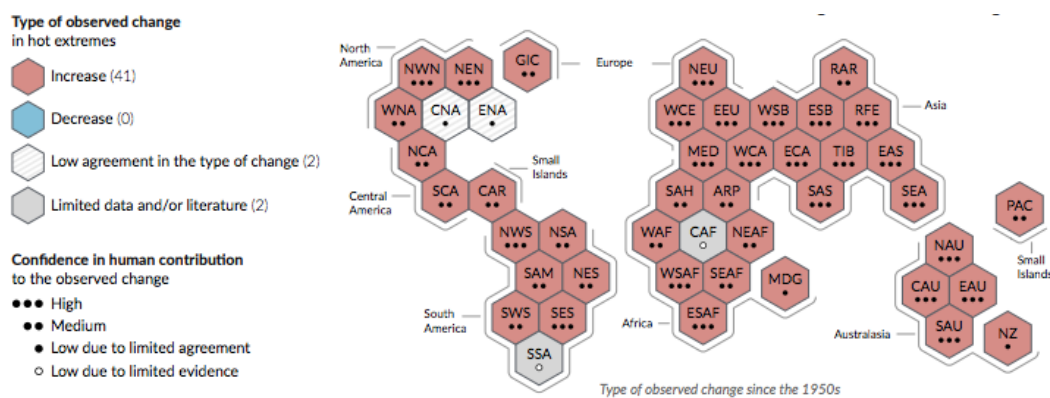


Figure 36. Changements mondiaux des extrêmes chauds (GIEC, 2021).

Bien que des résultats nuls pour la majorité des caractéristiques des VC ont été observés, ceci ne veut pas pour autant dire que le réchauffement du climat dans notre région n'est pas réel. En effet, les tendances des températures moyennes et des VC n'évolue pas de la même façon. De plus, ceci ne veut pas dire que ce genre d'événement ne deviendra pas plus fréquent dans le futur. Il est possible que les tendances à la hausse des

caractéristiques des VC soient seulement perceptibles dans quelques années, dû à un délai, car plusieurs scénarios démontrent que le Canada connaîtra une hausse importante des VC au cours du 21^e siècle (Clark et al., 2006; Fischer & Schär, 2010a; Khaliq et al., 2005; Meehl & Tebaldi, 2004; Perkins-Kirkpatrick & Gibson, 2017; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013).

5.3 Limitations de l'étude

D'abord, la définition du phénomène des VC de chaleur est la limite la plus importante de cette étude. Effectivement, puisqu'il n'existe pas de définition universelle ou standard du phénomène, il est très complexe d'analyser les tendances des VC (Dahl et al., 2019; Deo et al., 2007; Lebel et al., 2017; Z. Li et al., 2018; Meehl & Tebaldi, 2004; Perkins et al., 2012; Perkins & Alexander, 2013; Sanderson et al., 2017; Smith et al., 2013; Xu et al., 2016; Yusa et al., 2015). La grande variété de définitions des VC demeurent pour l'instant une barrière importante à leur analyse puisqu'il est très ardu de tirer des conclusions fiables.

Deuxièmement, notre étude se limite à l'analyse des tendances de trois RMR du sud-est du Canada et donc nos conclusions ne s'appliquent pas à l'ensemble du sud-est du Canada et encore moins à l'ensemble du pays. Comme on l'a démontré avec nos résultats, les tendances sont dépendantes de la région d'étude, ce qui nous prouve que chacune des RMR du Canada a ses propres particularités climatiques qui influencent les tendances des VC. Il pourrait être intéressant de réaliser cette même étude, mais cette fois avec plusieurs stations du sud-est du Canada, afin d'avoir une couverture plus représentative et de comparer les tendances de chacune des sous-régions.

Une autre limite de notre étude concerne la localisation des stations et leur période d'enregistrement. En effet, les stations utilisées sont situées un peu en périphérie des villes puisque souvent les stations des aéroports avaient une période d'enregistrement beaucoup plus longue et continue que celles situées en plein milieu de la ville. Or, ces stations ne permettent pas de représenter exactement les températures enregistrées dans les centres-villes. De plus, les données de l'Humidex dans notre région d'étude sont seulement disponibles à partir des années 1950, ceci limite donc l'interprétation des tendances et des résultats.

Enfin, une dernière limitation de notre étude concerne les analyses statistiques qui ont été réalisées. La régression linéaire a été utilisée pour analyser la signification des tendances observées, cependant ceci assume que nous sommes en présence de tendances linéaires, alors qu'il est possible que ce ne soit pas le cas. Également, les analyses concernant la comparaison des tendances des caractéristiques des VC entre les régions rurales et urbaines sont très préliminaires. Il serait donc important dans le futur de revenir sur ces résultats et réaliser davantage d'analyses afin de mieux comprendre les résultats conflictuels entre nos interprétations.

5.4 Considérations futures

Bien qu'au niveau mondial plusieurs études se sont intéressées à documenter l'évolution des caractéristiques des VC, on retrouve peu d'étude qui permet d'identifier les causes ou les facteurs externes qui jouent un rôle dans l'amplification de ce phénomène (GIEC, 2021). Avoir une meilleure compréhension des mécanismes atmosphériques ainsi que des forçages externes et internes causant les VC serait très pertinent. Par exemple, il

pourrait être pertinent d'étudier les liens entre les VC et le forçage solaire, le volcanisme, El Niño et les différentes oscillations atmosphériques et océaniques.

Il serait également intéressant d'étudier les VC en employant des définitions des VC qui prennent en compte les températures minimales ou encore les températures moyennes. Comme par exemple, une définition à double seuil qui analyse la combinaison d'un seuil maximal et minimal tel que présenté par Environnement Canada. Ceci pourrait démontrer des tendances complètement différentes puisque les températures moyennes, de même que minimales, ont significativement augmenté au cours des dernières décennies dans la région d'étude. Au contraire, la température maximale, mesure utilisée dans le cadre de nos analyses, n'a pas démontré d'augmentation significative, il est donc plutôt normal que les tendances des extrêmes chauds reflètent les mêmes signaux. Enfin, il serait important de réaliser davantage d'analyses sur les régions rurales situées en périphérie des grandes villes canadiennes, afin de pouvoir mieux expliquer les tendances observées dans ces régions. Pour l'instant, les tendances et les conclusions demeurent très préliminaires.

5.5 Contributions

Les résultats de cette étude offrent un avancement au niveau des connaissances reliées aux VC et à leur tendance historique et régionale pour nos RMR. Nous sommes maintenant en mesure de démontrer que les différentes caractéristiques des VC n'ont pas nécessairement augmenté dans les régions d'étude. Par contre, nous pouvons démontrer que les périodes très chaudes et humides deviennent et vont devenir de plus en plus récurrentes. Étant donné que les PCA ont des impacts assez importants pour les populations qui les subissent, il est important de continuer les mesures d'urgence lorsque ce genre de situation se produit afin de protéger les groupes les plus à risques.

Bibliographie

- Anderson, C. A. (2001). Heat and violence. *Current Directions in Psychological Science*, *10*(1), 33–38. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00109>
- Anderson, G. B., & Bell, M. L. (2011). Heat Waves in the United States: Mortality Risk during Heat Waves and Effect Modification by Heat Wave Characteristics in 43 U.S. Communities. *Environmental Health Perspectives*, *119*(2), 210–218. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002313>
- Atlas climatique du Canada. (2019). *Accueil | Atlas climatique du Canada*. <https://atlasclimatique.ca/>
- Baldwin, D. J. B., Desloges, J. R., & Band, L. E. (2000). Chapter 2: Physical Geography of Ontario. In A. H. Perera, D. L. Euler, & I. D. Thompson (Eds.), *Ecology of a Managed Terrestrial Landscape* (pp. 12–29). UBC Press.
- Basara, J. B., Basara, H. G., Illston, B. G., & Crawford, K. C. (2010). The Impact of the Urban Heat Island during an Intense Heat Wave in Oklahoma City. *Advances in Meteorology*, *2010*, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2010/230365>
- Brooke Anderson, G., Bell, M. L., & Peng, R. D. (2013). Methods to calculate the heat index as an exposure metric in environmental health research. In *Environmental Health Perspectives* (Vol. 121, Issue 10, pp. 1111–1119). National Institute of Environmental Health Sciences. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206273>
- Bustinza, R., Lebel, G., Gosselin, P., Bélanger, D., & Chebana, F. (2013). Health impacts of the July 2010 heat wave in Québec, Canada. *BMC Public Health*, *13*(1), 56. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-56>
- Caron, É., Touil, D., & Tremblay, S. (2007). *Projet de lutte aux îlots de chaleur urbains - Le verdissement Montréalais*.
- CCES. (n.d.). *Heat Waves and Climate Change | Center for Climate and Energy Solutions*. Retrieved January 18, 2021, from <https://www.c2es.org/content/heat-waves-and-climate-change/>
- CCN. (n.d.). *Ceinture de verdure - Commission de la capitale nationale*. Retrieved March 19, 2021, from <https://ccn-ncc.gc.ca/endroits/ceinture-de-verdure>
- Chebana, F., Martel, B., Gosselin, P., Giroux, J. X., & 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. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0590-2>
- Chien, L. C., Guo, Y., & Zhang, K. (2016). Spatiotemporal analysis of heat and heat wave effects on elderly mortality in Texas, 2006–2011. *Science of the Total Environment*, *562*, 845–851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.042>
- Clark, R. T., Brown, S. J., & Murphy, J. M. (2006). Modeling Northern Hemisphere summer heat extreme changes and their uncertainties using a physics ensemble of climate sensitivity experiments. *Journal of Climate*, *19*(17), 4418–4435.

<https://doi.org/10.1175/JCLI3877.1>

- Climate data. (n.d.). *Extreme heat waves in Québec — Climate Data Canada*. Retrieved January 18, 2021, from <https://climatedata.ca/case-study/extreme-heat-waves-in-quebec/>
- Coffel, E. D., Horton, R. M., & De Sherbinin, A. (2018). Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century. In *Environmental Research Letters* (Vol. 13, Issue 1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa00e>
- Colombo, A. F., Etkin, D., & Karney, B. W. (1999). Climate variability and the frequency of extreme temperature events for nine sites across Canada: Implications for power usage. *Journal of Climate*, *12*(8 PART 2), 2490–2502. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2490:cvatfo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2490:cvatfo>2.0.co;2)
- Conseil des académies canadiennes. (2019). *Les principaux risques des changements climatiques pour le Canada*. <https://rapports-cac.ca/reports/accorder-la-priorite-aux-plus-importants-risques-poses-par-les-changements-climatiques/>
- Dahl, K., Licker, R., Abatzoglou, J. T., & Declet-Barreto, J. (2019). Increased frequency of and population exposure to extreme heat index days in the United States during the 21st century. *Environmental Research Communications*, *1*(7), 075002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab27cf>
- Davis, R. E., Knappenberger, P. C., Michaels, P. J., & Novicoff, W. M. (2003). Changing heat-related mortality in the United States. *Environmental Health Perspectives*, *111*(14), 1712–1718. <https://doi.org/10.1289/ehp.6336>
- Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Luterbacher, J., & Wanner, H. (2007). Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *112*(15), 15103. <https://doi.org/10.1029/2007JD008510>
- Delworth, T. L., Mahlman, J. D., & Knutson, T. R. (1999). Changes in Heat Index associated with CO₂-induced global warming. *Climatic Change*, *43*(2), 369–386. <https://doi.org/10.1023/A:1005463917086>
- Deo, R. C., McAlpine, C. A., Syktus, J., McGowan, H. A., & Phinn, S. (2007). On Australian heat waves: Time series analysis of extreme temperature events in Australia, 1950-2005. *MODSIM07 - Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability, Proceedings*, 626–635.
- Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, *3*(6), 563–566. <https://doi.org/10.1038/nclimate1827>
- ECCC. (2018a). *Aléas météorologiques de la saison chaude - Canada.ca*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/meteo-saisonniere-dangereuse/aleas-meteorologiques-saison-chaude.html#toc8>
- ECCC. (2018b). *Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010*. Normes Climatiques Canadiennes. http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/

- ECCC. (2019). *Changements dans la température - Canada.ca*.
<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques/essentiels/tendances-projections/changements-temperature.html>
- ECCC. (2020). *Criteria for public weather alerts*.
<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/types-weather-forecasts-use/public/criteria-alerts.html#heat>
- ECCC. (2021). *Glossaire - Climat - Environnement et Changement climatique Canada*.
https://climat.meteo.gc.ca/glossary_f.html#h
- Feron, S., Cordero, R. R., Damiani, A., Llanillo, P. J., Jorquera, J., Sepulveda, E., Asencio, V., Laroze, D., Labbe, F., Carrasco, J., & Torres, G. (2019). Observations and Projections of Heat Waves in South America. *Scientific Reports*, 9(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-44614-4>
- Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (2014). Climate change 2014 impacts, adaptation and vulnerability: Part A: Global and sectoral aspects: Working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379>
- Fischer, E. M., Oleson, K. W., & Lawrence, D. M. (2012). Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 39(3), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011GL050576>
- Fischer, E. M., & Schär, C. (2010a). Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 3(6), 398–403.
<https://doi.org/10.1038/ngeo866>
- Fischer, E. M., & Schär, C. (2010b). Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 3(6), 398–403.
<https://doi.org/10.1038/ngeo866>
- FMEQ. (2019). *Le climat s'invite dans nos urgences – les impacts sur la santé des changements climatiques*.
- Founda, D., Pierros, F., Katavoutas, G., & Keramitsoglou, I. (2019). Observed trends in thermal stress at European cities with different background climates. *Atmosphere*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/atmos10080436>
- GIEC. (2021). *Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Guttorp, P. (2010). *Extreme events in climate and weather-an interdisciplinary workshop*.
<http://temple.birs.ca/>
- Habeeb, D., Vargo, J., & Stone, B. (2015). Rising heat wave trends in large US cities.

- Natural Hazards* 2015 76:3, 76(3), 1651–1665. <https://doi.org/10.1007/S11069-014-1563-Z>
- Harlan, S. L., Declet-Barreto, J. H., Stefanov, W. L., & Petitti, D. B. (2013). Neighborhood effects on heat deaths: Social and environmental predictors of vulnerability in Maricopa county, Arizona. In *Environmental Health Perspectives* (Vol. 121, Issue 2, pp. 197–204). <https://doi.org/10.1289/ehp.1104625>
- Herring, S. C., Hoerling, M. P., Kossin, J. P., Peterson, T. C., & Stott, P. A. (2019). Introduction to explaining extreme events of 2014 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(1), SII-S4. <https://doi.org/10.1175/BAMS-EXPLAININGEXTREMEEVENTS2017.1>
- INSPQ. (n.d.). *Vagues de chaleur*. Retrieved January 4, 2021, from <http://www.monclimatmasante.qc.ca/vagues-de-chaleur.aspx>
- Kaiser, D., Lamothe, F., Roy, M., Racine-Hamel, S.-É., Edger, M.-A., Lefebvre, L., Njosing, B., Perron, S., Pinard, M., Tailhandier, M., Tcholakov, Y., & Baptiste, C. J. (2019). *Enquête épidémiologique-Vague de chaleur à l'été 2018 à Montréal est une production de la Direction régionale de santé publique*. www.santemontreal.qc.ca
- Katz, R. W., & Brown, B. G. (1992). Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21(3), 289–302. <https://doi.org/10.1007/BF00139728>
- Khaliq, M. N., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., Bobée, B., & Bobée, B. (2005). Frequency Analysis and Temporal Pattern of Occurrences of Southern Quebec Heatwaves. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY Int. J. Climatol*, 25, 485–504. <https://doi.org/10.1002/joc.1141>
- Lebel, G., Dubé, M., & Bustinza, R. (2017). *Analyse des impacts des vagues régionales de chaleur extrême sur la santé au Québec de 2010 à 2015: changements climatiques*. <http://www.inspq.qc.ca>.
- Lebel, G., Dubé, M., & Bustinza, R. (2019). *Surveillance des impacts des vagues de chaleur extrême sur la santé au Québec à l'été 2018*. <https://www.inspq.qc.ca/bise/surveillance-des-impacts-des-vagues-de-chaleur-extreme-sur-la-sante-au-quebec-l-ete-2018#ref>
- Li, D., Yuan, J., & Kopp, R. E. (2020). Escalating global exposure to compound heat-humidity extremes with warming. *Environmental Research Letters*, 15(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d04>
- Li, Z., Huang, G., Huang, W., Lin, Q., Liao, R., & Fan, Y. (2018). Future changes of temperature and heat waves in Ontario, Canada. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(3–4), 1029–1038. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2123-8>
- Lyon, B., & Barnston, A. G. (2017). Diverse characteristics of U.S. summer heat waves. *Journal of Climate*, 30(19), 7827–7845. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0098.1>
- Martel, B., Giroux, J.-X., Gosselin, P., Chebana, F., Ouarda, T. B. M. J., & Charron, C. (2010). *Indicateurs et seuils météorologiques pour les systèmes de veille-avertissement lors de vagues de chaleur au Québec*. <http://www.inspq.qc.ca>.

- Mazdiyasni, O., & AghaKouchak, A. (2015). Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *112*(37), 11484–11489. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422945112>
- Mazdiyasni, O., Sadegh, M., Chiang, F., & AghaKouchak, A. (2019). Heat wave Intensity Duration Frequency Curve: A Multivariate Approach for Hazard and Attribution Analysis. *Scientific Reports*, *9*(1), 14117. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50643-w>
- Mcleman, R. (2006). *Migration Out of 1930s Rural Eastern Oklahoma: Insights for Migration Out of 1930s Rural Eastern Oklahoma: Insights for Climate Change Research Climate Change Research*. <https://digitalcommons.unl.edu/greatplainsquarterly/151>
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, *305*(5686), 994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2018a). *Août 2018 : une chaleur sans précédent en 146 ans dans le sud du Québec*. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2018/aout.htm>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2018b). *Juillet 2018 : le mois le plus chaud depuis 1921 au sud du Québec*. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2018/juillet.htm>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2018c). *Septembre 2018 : l'été le plus chaud en 146 ans d'observations au sud du Québec se confirme*. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2018/septembre.htm>
- Oleson, K. W., Monaghan, A., Wilhelmi, O., Barlage, M., Brunsell, N., Feddema, J., Hu, L., & Steinhoff, D. F. (2015). Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. *Climatic Change*, *129*(3–4), 525–541. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0936-8>
- OMM. (2017). WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. *WMO-No. 1203*, 1203, 18. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4220
- OMM. (2021). *2020 est l'une des trois années les plus chaudes jamais enregistrées | Organisation météorologique mondiale*. <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqués-de-presse/2020-est-l'une-des-trois-années-les-plus-chaudes-jamais-enregistrées?fbclid=IwAR06b3n3WXC9ra44Bba8viE7EfWtTkmOrmo7x35KAlY83ypJZrlQzGscG5k>
- Oudin Åström, D., Bertil, F., & Joacim, R. (2011). Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies. In *Maturitas* (Vol. 69, Issue 2, pp. 99–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.03.008>
- Ouranos. (2020). *Portraits climatiques : Province du Québec*. <https://www.ouranos.ca/portraits-climatiques/#/>

- PCC. (2019). *A SPECIAL REPORT ON CLIMATE CHANGE IN CANADA HEAT WAVES AND HEALTH Heat Waves of the Future Longer, hotter, and more of them: a look at what climate models project for Canada Risk to Resilience Take action to prevent global warming from getting worse Heat.*
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Gibson, P. B. (2017). Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12520-2>
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
- Perkins, S. E., Alexander, L. V., & Nairn, J. R. (2012). Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophysical Research Letters*, 39(20), 20714. <https://doi.org/10.1029/2012GL053361>
- Philips, D. (2013). *Heat Wave* | *The Canadian Encyclopedia*. <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/heat-wave>
- Puderer, H. (2009). *Perspectives et mesures de l'urbain*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92f0138m/92f0138m2009001-fra.htm>
- Raymond, T. (2020). *Ottawa records hottest July since 1921* | *CTV News*. 2020. <https://ottawa.ctvnews.ca/ottawa-records-hottest-july-since-1921-1.5047353>
- Ressources naturelles et Faune Québec. (2006). *Les Zones de végétation - Région de l'Outaouais*. <https://mern.gouv.qc.ca/publications/outaouais/carte-vegetation.pdf>
- Robert W. Schlegel and Albertus J. Smit. (2018). *Calculating and Visualising Exceedances • heatwaveR*. (2018). HeatwaveR: A Central Algorithm for the Detection of Heatwaves and Cold-Spells. *Journal of Open Source Software*, 3(27), 821., <https://robwschlegel.github.io/heatwaveR/articles/exceedance.html>
- Rousseau, A. N., Klein, I. M., Freudiger, D., Gagnon, P., Frigon, A., & Ratté-Fortin, C. (2014). Development of a methodology to evaluate probable maximum precipitation (PMP) under changing climate conditions: Application to southern Quebec, Canada. *Journal of Hydrology*, 519(PD), 3094–3109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.053>
- Roy, L.-A., Price, K., Pâquet, M., Vida, S., Sénécal, G., Lefebvre, L., Perron, S., & King, N. (2010). Canicule 2010 à Montréal. Rapport du directeur de santé publique. In *Archives*. https://santemontreal.qc.ca/fileadmin/user_upload/Uploads/tx_asssmpublications/pdf/publications/978-2-89673-036-0.pdf
- Russo, S., Sillmann, J., & Sterl, A. (2017). *Humid heat waves at different warming levels OPEN*. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07536-7>
- Sanderson, M. G., Economou, T., Salmon, K. H., & Jones, S. E. O. (2017). Historical trends and variability in heat waves in the United Kingdom. *Atmosphere*, 8(10).

<https://doi.org/10.3390/atmos8100191>

- Santé Canada. (2008). *Les changements climatiques et la santé*. 8–9.
<https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/changements-climatiques-sante.html>
- Santé Canada. (2011a). *Extreme heat: heat waves - Canada.ca*.
<https://www.canada.ca/en/health-canada/services/sun-safety/extreme-heat-heat-waves.html>
- Santé Canada. (2011b). *Lignes directrices à l'intention des travailleurs et des administrateurs de la santé pendant les périodes de chaleur accablante : un guide de l'utilisateur*. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/changement-climatique-sante/lignes-directrices-intention-travailleurs-sante-pendant-periodes-chaleur-accablante-guide-technique.html#a1.2>
- Santé et services sociaux Québec. (2019). *Systèmes d'alerte et de surveillance - Chaleur extrême - Professionnels de la santé - MSSS*.
<https://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/sante-environnementale/chaleur-extreme/systemes-d-alerte-et-de-surveillance/>
- Smith, T. T., Zaitchik, B. F., & Gohlke, J. M. (2013). Heat waves in the United States: Definitions, patterns and trends. *Climatic Change*, 118(3–4), 811–825.
<https://doi.org/10.1007/s10584-012-0659-2>
- Smoyer-Tomic, K. E., Kuhn, R., & Hudson, A. (2003). Heat wave hazards: An overview of heat wave impacts in Canada. *Natural Hazards*, 28(2–3), 463–485.
<https://doi.org/10.1023/A:1022946528157>
- Smoyer, K. E., Rainham, D. G. C., & Hewko, J. N. (2000). Heat-stress-related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980-1996. *International Journal of Biometeorology*, 44(4), 190–197. <https://doi.org/10.1007/s004840000070>
- Snider, L. (2016). *Searing heat waves detailed in study of future climate | NCAR & UCAR News*. <https://news.ucar.edu/19559/searing-heat-waves-detailed-study-future-climate>
- Statistique Canada. (2006). *Délimitation des régions urbaines de 2006 : Défis et réalisations*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92f0138m/92f0138m2008001-fra.htm>
- Statistique Canada. (2016a). *Dictionnaire, Recensement de la population, 2016 - Centre de population (CTRPOP)*. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/ref/dict/geo049a-fra.cfm>
- Statistique Canada. (2016b). *Les municipalités les plus peuplées au Canada et présentant les croissances démographiques les plus élevées entre 2011 et 2016*. [www12.Statcan.Gc.Ca. https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/as-sa/98-200-x/2016001/98-200-x2016001-fra.cfm](https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/as-sa/98-200-x/2016001/98-200-x2016001-fra.cfm)
- Tebaldi, C., & Wehner, M. F. (2018). Benefits of mitigation for future heat extremes under RCP4.5 compared to RCP8.5. *Climatic Change*, 146(3–4), 349–361.
<https://doi.org/10.1007/s10584-016-1605-5>

- Xu, Z., FitzGerald, G., Guo, Y., Jalaludin, B., & Tong, S. (2016). Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis. In *Environment International* (Vols. 89–90, pp. 193–203). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.007>
- Yusa, A., Berry, P., Cheng, J. J., Ogden, N., Bonsal, B., Stewart, R., & Waldick, R. (2015). Climate change, drought and human health in Canada. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 12, Issue 7, pp. 8359–8412). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph120708359>
- Zhang, X., & al. (2019). *Les changements de température et de précipitations au Canada - Rapport Sur le Climate Changeant du Canada*. [https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/RCCC_Chapitre4-Les changements de température et de précipitations au Canada-1.pdf](https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/RCCC_Chapitre4-Les%20changements%20de%20temp%C3%A9rature%20et%20de%20pr%C3%A9cipitations%20au%20Canada-1.pdf)

ANNEXE A – CODE RSTUDIO

Modules rStudio

```
#install.packages("dplyr")
library("dplyr")

#install.packages("ggpubr")
library(ggpubr)

#install.packages("knitr")
library(knitr)

#install.packages("rmarkdown")
library(rmarkdown)

#install.packages("tidync")
library(tidync)

#install.packages("tidyr")
library(tidyr)

#install.packages("heatwaveR")
library(heatwaveR)

#install.packages("tidyverse")
library(tidyverse)

#HeatwaveR package will importe plyr, tibble, lubridate, dplyr, stats, utils, zoo,
grid, RcppRoll, plotly, data.table, ggplot2
```

Code rStudio pour les normales climatiques

Téléchargement des données

```
tor_intl="/Users/marie/Google Drive/Maitrise-uOttawa/These/10. Analyse de
donnees quotidiennes/3. Toronto/Toronto Intl A (1937-2020) copy 2.csv"

tor_intl=read.csv(tor_intl)
tor_intl = as_tibble(tor_intl)
```

Développement des équations par mois

```
month= group_by(tor_intl, LOCAL_YEAR, LOCAL_MONTH)
mean_month=summarize(month, mean_monthly_tem =
mean(MEAN_TEMPERATURE, na.rm = TRUE))
max_month=summarize(month, max_monthly_tem =
mean(MAX_TEMPERATURE, na.rm = TRUE))
min_month=summarize(month, min_monthly_tem = mean(MIN_TEMPERATURE,
na.rm = TRUE))
total_prec=summarize(month, total_prec_monthly=sum(TOTAL_PRECIPITATION,
na.rm = TRUE))
```

Filtrer la moyenne des mois d'été

```
mean_mai=filter(mean_month, LOCAL_MONTH == 5)
mean_juin=filter(mean_month, LOCAL_MONTH == 6)
mean_juillet=filter(mean_month, LOCAL_MONTH == 7)
mean_aout=filter(mean_month, LOCAL_MONTH == 8)
mean_septembre=filter(mean_month, LOCAL_MONTH == 9)
```

Filtrer la moyenne maximale des mois d'été

```
max_mai=filter(max_month, LOCAL_MONTH == 5)
max_juin=filter(max_month, LOCAL_MONTH == 6)
max_juillet=filter(max_month, LOCAL_MONTH == 7)
max_aout=filter(max_month, LOCAL_MONTH == 8)
max_septembre=filter(max_month, LOCAL_MONTH == 9)
```

Filtrer la moyenne minimale des mois d'été

```
min_mai=filter(min_month, LOCAL_MONTH == 5)
min_juin=filter(min_month, LOCAL_MONTH == 6)
min_juillet=filter(min_month, LOCAL_MONTH == 7)
min_aout=filter(min_month, LOCAL_MONTH == 8)
min_septembre=filter(min_month, LOCAL_MONTH == 9)
```

Filtrer les précipitations moyennes

```
prec_mai=filter(total_prec, LOCAL_MONTH == 5)
prec_juin=filter(total_prec, LOCAL_MONTH == 6)
prec_juillet=filter(total_prec, LOCAL_MONTH == 7)
prec_aout=filter(total_prec, LOCAL_MONTH == 8)
prec_septembre=filter(total_prec, LOCAL_MONTH == 9)
```

Développement des fonctions pour les normales climatiques

```

mean_months=function(month, myycol, mytitle, mysubtitle) {
  ggplot2::ggplot(data=month, aes(x=LOCAL_YEAR, y={{myycol}}))+
    geom_line()+
    geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
    stat_cor(aes(label = paste(..rr.label.., ..p.label.., sep = "~`, `~")),
             label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
    labs(title = mytitle,
         subtitle = mysubtitle,
         x="Année", y="Température °C")+
    theme_classic2()
}

```

```

prec_months=function(month, myycol, mytitle, mysubtitle) {
  ggplot2::ggplot(data=month, aes(x=LOCAL_YEAR, y={{myycol}}))+
    geom_col()+
    geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
    stat_cor(aes(label = paste(..rr.label.., ..p.label.., sep = "~`, `~")),
             label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
    labs(title = mytitle,
         x="Année", y="Précipitations (mm)")+
    theme_classic2()
}

```

Création des graphiques

```

#Monthly mean
mean_months(mean_mai, mean_monthly_tem, "Température moyenne de
mai", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(mean_juin, mean_monthly_tem, "Température moyenne de
juin", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(mean_juillet, mean_monthly_tem, "Température moyenne de
juillet", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(mean_aout, mean_monthly_tem, "Température moyenne de
août", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(mean_septembre, mean_monthly_tem, "Température moyenne
de septembre", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")

```

```

#Monthly max
mean_months(max_mai, max_monthly_tem, "Température moyenne maximale
de mai", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")

```

```

mean_months(max_juin, max_monthly_tem, "Température moyenne maximale
de juin", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(max_juillet, max_monthly_tem, "Température moyenne
maximale de juillet", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(max_aout, max_monthly_tem, "Température moyenne maximale
de août", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(max_septembre, max_monthly_tem, "Température moyenne
maximale de septembre", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")

```

#Monthly min

```

mean_months(min_mai, min_monthly_tem, "Température moyenne minimale
de mai", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(min_juin, min_monthly_tem, "Température moyenne minimale
de juin", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(min_juillet, min_monthly_tem, "Température moyenne minimale
de juillet", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(min_aout, min_monthly_tem, "Température moyenne minimale
de août", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")
mean_months(min_septembre, min_monthly_tem, "Température moyenne
minimale de septembre", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")

```

#Monthly total precipitations

```

prec_months(prec_mai, total_prec_montly, "Précipitation totale de mai",
"Toronto Intl entre 1937 et 2020")
prec_months(prec_juin, total_prec_montly, "Précipitation totale de juin",
"Toronto Intl entre 1937 et 2020")
prec_months(prec_juillet, total_prec_montly, "Précipitation totale de juillet",
"Toronto Intl entre 1937 et 2020")
prec_months(prec_aout, total_prec_montly, "Précipitation totale de août",
"Toronto Intl entre 1937 et 2020")
prec_months(prec_septembre, total_prec_montly, "Précipitation totale de
septembre", "Toronto Intl entre 1937 et 2020")

```

Top 10 des mois d'été les plus chauds

#Mai

```

top.mai=arrange(mean_mai, desc(mean_monthly_tem))
knitr :: kable(top.mai[1:10, ],caption = "Tableau 1. Les 10 mois de mai les plus
chauds à Ottawa entre 1937 et 2020")

```

#Juin

```

top.juin=arrange(mean_juin, desc(mean_monthly_tem))
knitr :: kable(top.juin[1:10, ],caption = "Tableau 2. Les 10 mois de juin les plus
chauds à Ottawa entre 1937 et 2020")

```

```

#Juillet
top.juillet=arrange(mean_juillet, desc(mean_monthly_tem))
knitr :: kable(top.juillet[1:10, ],caption = "Tableau 3. Les 10 mois de juillet les plus
chauds à Ottawa entre 1937 et 2020")

#Août
top.aout=arrange(mean_aout, desc(mean_monthly_tem))
knitr :: kable(top.aout[1:10, ],caption = "Tableau 4. Les 10 mois de aout les plus
chauds à Ottawa entre 1937 et 2020")

#Septembre
top.septembre=arrange(mean_septembre, desc(mean_monthly_tem))
knitr :: kable(top.septembre[1:10, ],caption = "Tableau 5. Les 10 mois de
septembre les plus chauds à Ottawa entre 1937 et 2020")

```

Top 10 des années les plus chaudes

```

year= group_by(tor_intl, LOCAL_YEAR)
mean_year=summarize(year, mean_yearly_tem = mean(MEAN_TEMPERATURE,
na.rm = TRUE))

ggplot(data=mean_year, aes(x=LOCAL_YEAR, y=mean_yearly_tem))+
  geom_line()+
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
  stat_cor(aes(label = paste(..rr.label.., ..p.label.., sep = "~`,`~")),
  label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
  labs(title = "Site C - Toronto",
  x="Année", y="Température °C")+
  theme_classic2()

#Arrange rows for top 10 hottest years
top_year=arrange(mean_year, desc(mean_yearly_tem))
knitr :: kable(
  top_year[1:10, ],
  caption = "Tableau 6. Les 10 années les plus chaudes à Ottawa entre 1937 et
2020"
)

```

Analyses pour l'été au complet

```

summer_months=subset.data.frame(tor_intl, tor_intl[,2]>=5 & tor_intl[,2]<=9)
summer_mean=aggregate(MEAN_TEMPERATURE ~ LOCAL_YEAR, data =
summer_months, mean)

```

```

summer_min=aggregate(MIN_TEMPERATURE ~ LOCAL_YEAR, data =
summer_months, mean)
summer_max=aggregate(MAX_TEMPERATURE ~ LOCAL_YEAR, data =
summer_months, mean)
summer_prec=aggregate(TOTAL_PRECIPITATION ~ LOCAL_YEAR, data =
summer_months, sum)

mean_months=function(month, myycol, mytitle, mysubtitle) {
ggplot2::ggplot(data=month, aes(x=LOCAL_YEAR, y={{myycol}}))+
  geom_line()+
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
  stat_cor(aes(label = paste(..rr.label., ..p.label., sep = "~`, `~")),
    label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
  labs(title = mytitle,
    x="Année", y="Température °C")+
  theme_classic2()
}

```

Graphiques estivaux complets

```

mean_months(summer_mean, MEAN_TEMPERATURE, "Site C - Toronto")
mean_months(summer_min, MIN_TEMPERATURE, "Site C - Toronto")
mean_months(summer_max, MAX_TEMPERATURE, "Site C - Toronto")
prec_months(summer_prec, TOTAL_PRECIPITATION, "Site C - Toronto")

```

Top 10 des années les plus chauds

```

as.data.frame(summer_mean)
top_summer=arrange(summer_mean, desc(MEAN_TEMPERATURE))
knitr :: kable(top_summer[1:10, ],caption = "Tableau 6. Les 10 étés les plus
chauds à Ottawa entre 1937 et 2020")

```

Code rStudio pour les tendances des VC

Fonctions pour mesurer la FVC, DVC, IVC, SVC, SJC, PVC

```

#Fréquence annuelle des vagues de chaleur
HW_freq=function(exceedance, mytitle, mysubtitle) {
ggplot2::ggplot(data=exceedance, aes(x=year, y=count, color = Seuil))+
  geom_col(aes(fill=Seuil), position = "dodge")+
  stat_cor(aes(label = paste(..rr.label., ..p.label., sep = "~`, `~")),
    label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
  labs(title = mytitle,

```

```

    x="Année", y="Nombre de VC")+
  scale_x_continuous(breaks = c(1980, 1990, 2000, 2010, 2020))+
  theme_classic2()
}

#Durée de la plus longue vague de chaleur annuelle
HW_lenght=function(exceedance, mytitle, mysubtitle) {
ggplot2::ggplot(data=exceedance, aes(x=year, y=duration_max, color = Seuil))+
  geom_col(aes(fill=Seuil), position = "dodge")+
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
  stat_cor(aes(label = paste(..rr.label., ..p.label., sep = "~`, `~")),
    label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
  labs(title = mytitle,
    x="Année", y="Jour")+
  scale_x_continuous(breaks = c(1980, 1990, 2000, 2010, 2020))+
  theme_classic2()
}

#Intensité de la vague de chaleur la plus intense de l'année
HW_intensity=function(exceedance, mytitle, mysubtitle) {
ggplot2::ggplot(data=exceedance, aes(x=year, y=intensity_max_max, color =
Seuil))+
  geom_col(aes(fill=Seuil), position = "dodge")+
  stat_cor(aes(label = paste(..rr.label., ..p.label., sep = "~`, `~")),
    label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
  labs(title = mytitle,
    x="Année", y="Intensité (°C)")+
  scale_x_continuous(breaks = c(1980, 1990, 2000, 2010, 2020))+
  theme_classic2()
}

#Nombre de jour participant aux vagues de chaleur
HW_days=function(exceedance, mytitle, mysubtitle) {
ggplot2::ggplot(data=exceedance, aes(x=year, y=total_days, color = Seuil))+
  geom_col(aes(fill=Seuil), position = "dodge")+
  stat_cor(aes(label = paste(..rr.label., ..p.label., sep = "~`, `~")),
    label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
  labs(title = mytitle,
    x="Année", y="Jour")+
  scale_x_continuous(breaks = c(1980, 1990, 2000, 2010, 2020))+
  theme_classic2()
}

```

```
#Fonction pour le nombre de journées chaudes
HW_heatdays=function(exceedance, mytitle, mysubtitle) {
  ggplot2::ggplot(data=exceedance, aes(x=year, y=total_days, color = Seuil))+
    geom_col(aes(fill=Seuil), position = "dodge")+
    stat_cor(aes(label = paste(..rr.label.., ..p.label.., sep = "~`, `~")),
             label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
    geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
    labs(title = mytitle,
         x="Année", y="Jour")+
    scale_x_continuous(breaks = c(1980, 1990, 2000, 2010, 2020))+
    theme_classic2()
}
```

Mesure des différents seuils

```
#33°C threshold
thresh33 = exceedance(data = mtl_pet, x = t, y = tMax, threshold = 32.99,
                      minDuration = 3, maxGap = 0)
exceedance_33_average = block_average(thresh33,x=t,y=tMax)
```

```
#32°C threshold
thresh32 = exceedance(data = mtl_pet, x = t, y = tMax, threshold = 31.99,
                      minDuration = 3, maxGap = 0)
exceedance_32_average = block_average(thresh32,x=t,y=tMax)
```

```
#31°C threshold
thresh31 = exceedance(data = mtl_pet, x = t, y = tMax, threshold = 30.99,
                      minDuration = 3, maxGap = 0)
exceedance_31_average = block_average(thresh31,x=t,y=tMax)
```

```
#30°C threshold
thresh30 = exceedance(data = mtl_pet, x = t, y = tMax, threshold = 29.99,
                      minDuration = 3, maxGap = 0)
exceedance_30_average = block_average(thresh30,x=t,y=tMax)
```

Création des graphiques

```
#rbind
exceedance_33_average$Seuil = '33°C'
exceedance_32_average$Seuil = '32°C'
exceedance_31_average$Seuil = '31°C'
exceedance_30_average$Seuil = '30°C'
```

```

all_exceedance = rbind(exceedance_33_average, exceedance_32_average,
exceedance_31_average, exceedance_30_average)
colnames(all_exceedance)

all_exceedance <- all_exceedance %>%
  group_by(Seuil, year)

#Graphique pour la fréquence des VC selon les différents seuils
FVC = HW_freq(all_exceedance, "FVC")

#Graphiques de distribution de la durée de la plus longue vague de chaleur
DVC = HW_lenght(all_exceedance, "DVC")

#Graphiques de l'intensité de la vague de chaleur la plus intense de l'année
IVC = HW_intensity(all_exceedance, "IVC")

#Nombre de journée total annuelle participant aux vagues de chaleur
SVC = HW_days(all_exceedance, "SVC")

#Nombre annuel de journées chaudes
SJC = HW_heatdays(all_heatdays, "SJC")

```

Déterminer la date de la première VC

```

#Seuil de 33°C
start_date_33=thresh33$exceedance$date_start
as.data.frame(start_date_33)
start_date_33=as.Date(start_date_33,)

HW_first_day_33 = data.frame(date = start_date_33,
  year = as.numeric(format(start_date_33, format = "%Y")),
  month = as.numeric(format(start_date_33, format = "%m")),
  day = as.numeric(format(start_date_33, format = "%d")))

HW_first_day_33$Month_day = paste(HW_first_day_33$month,
HW_first_day_33$day, sep="-")

HW_first_day_33$Month_day = as.Date(HW_first_day_33$Month_day, format
="%m-%d")

HW_first_day_33$first_day = HW_first_day_33$Month_day - as.Date("2021-05-
01")

HW_first_day_33=HW_first_day_33[!duplicated(HW_first_day_33$year),]

```

```

#Seuil de 32°C
start_date_32=thresh32$exceedance$date_start
as.data.frame(start_date_32)
start_date_32=as.Date(start_date_32,)

HW_first_day_32 = data.frame(date = start_date_32,
                             year = as.numeric(format(start_date_32, format = "%Y")),
                             month = as.numeric(format(start_date_32, format = "%m")),
                             day = as.numeric(format(start_date_32, format = "%d")))

HW_first_day_32$Month_day = paste(HW_first_day_32$month,
HW_first_day_32$day, sep="-")

HW_first_day_32$Month_day = as.Date(HW_first_day_32$Month_day, format
="m-%d")

HW_first_day_32$first_day = HW_first_day_32$Month_day - as.Date("2021-05-
01")

HW_first_day_32=HW_first_day_32[!duplicated(HW_first_day_32$year),]

#Seuil de 31°C
start_date_31=thresh31$exceedance$date_start
as.data.frame(start_date_31)
start_date_31=as.Date(start_date_31,)

HW_first_day_31 = data.frame(date = start_date_31,
                             year = as.numeric(format(start_date_31, format = "%Y")),
                             month = as.numeric(format(start_date_31, format = "%m")),
                             day = as.numeric(format(start_date_31, format = "%d")))

HW_first_day_31$Month_day = paste(HW_first_day_31$month,
HW_first_day_31$day, sep="-")

HW_first_day_31$Month_day = as.Date(HW_first_day_31$Month_day, format
="m-%d")

HW_first_day_31$first_day = HW_first_day_31$Month_day - as.Date("2021-05-
01")

HW_first_day_31=HW_first_day_31[!duplicated(HW_first_day_31$year),]

#Seuil de 30°C

```

```

start_date_30=thresh30$exceedance$date_start
as.data.frame(start_date_30)
start_date_30=as.Date(start_date_30,)

HW_first_day_30 = data.frame(date = start_date_30,
                             year = as.numeric(format(start_date_30, format = "%Y")),
                             month = as.numeric(format(start_date_30, format = "%m")),
                             day = as.numeric(format(start_date_30, format = "%d")))

HW_first_day_30$Month_day = paste(HW_first_day_30$month,
HW_first_day_30$day, sep="-")

HW_first_day_30$Month_day = as.Date(HW_first_day_30$Month_day, format
="-%m-%d")

HW_first_day_30$first_day = HW_first_day_30$Month_day - as.Date("2021-05-
01")

HW_first_day_30=HW_first_day_30[!duplicated(HW_first_day_30$year),]

#rbind
HW_first_day_33$Seuil = '33°C'
HW_first_day_32$Seuil = '32°C'
HW_first_day_31$Seuil = '31°C'
HW_first_day_30$Seuil = '30°C'

all_firstday = rbind(HW_first_day_33, HW_first_day_32, HW_first_day_31,
HW_first_day_30)
colnames(all_firstday)

all_firstday <- all_firstday %>%
  group_by(Seuil, year)

#Fonction pour réaliser le graphique avec la date de la première vague de
chaleur de l'année
HW_first=function(df, mytitle, mysubtitle) {
ggplot2::ggplot(data=df, aes(x=year, y=first_day, color = Seuil))+
  geom_point()+
  stat_cor(aes(label = paste(..rr.label.., ..p.label.., sep = "~`,`~")),
           label.x.npc="middle", label.y.npc = "top")+
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)+
  labs(title = mytitle,
       x="Année", y="Jour depuis 1ier mai")+
  scale_x_continuous(breaks = c(1980, 1990, 2000, 2010, 2020))+

```

```

  theme_classic2()
}

PVC = HW_first(all_firstday, "PVC")

```

Imprimer les graphiques

```

FVC+theme(legend.position = "none")
DVC+theme(legend.position = "none")
SVC+theme(legend.position = "none")
IVC+theme(legend.position = "none")
SJC+theme(legend.position = "none")
PVC+theme(legend.position = "none")

```

Code rStudio pour les tendances des PCA

Téléchargement des données et conservation de l'Humidex maximale atteint au cours de la journée

```

#Download data
hmdx_ottmcd2="/Users/marie/Google Drive/Maitrise-uOttawa/These/11.
Analyse de données horaires/1. Ottawa-Gatineau/Analyse/hmdx_ottmcd2.csv"

hmdx_ottmcd2=read.csv(hmdx_ottmcd2)
hmdx_ottmcd2= as.data.frame(hmdx_ottmcd2)

hmdx_ottmcd2$t=paste(hmdx_ottmcd2$Year, hmdx_ottmcd2$Month,
hmdx_ottmcd2$Day, sep="-")

hmdx_ottmcd2$t=as.Date(hmdx_ottmcd2$t,)
class(hmdx_ottmcd2$t)

```

Fonctions de PCA

Les mêmes que pour les VC, voir plus haut.

Seuil selon les différents Humidex

```

#35 H threshold
thresh35 = exceedance(data = hmdx_ottmcd2, x = t, y = max_day_tem,
threshold = 34.99, minDuration = 3, joinAcrossGaps = FALSE, maxPadLength = 0)
exceedance_35_average = block_average(thresh35,x=t,y=max_day_tem)

#36 H threshold

```

```
thresh36 = exceedance(data = hmdx_ottmcdo2, x = t, y = max_day_tem,
threshold = 35.99, minDuration = 3, joinAcrossGaps = FALSE, maxPadLength = 0)
exceedance_36_average = block_average(thresh36,x=t,y=max_day_tem)
```

```
#37 H threshold
```

```
thresh37 = exceedance(data = hmdx_ottmcdo2, x = t, y = max_day_tem,
threshold = 36.99, minDuration = 3, joinAcrossGaps = FALSE, maxPadLength = 0)
exceedance_37_average = block_average(thresh37,x=t,y=max_day_tem)
```

```
#38 H threshold
```

```
thresh38 = exceedance(data = hmdx_ottmcdo2, x = t, y = max_day_tem,
threshold = 37.99, minDuration = 3, joinAcrossGaps = FALSE, maxPadLength = 0)
exceedance_38_average = block_average(thresh38,x=t,y=max_day_tem)
```

```
#39 H threshold
```

```
thresh39 = exceedance(data = hmdx_ottmcdo2, x = t, y = max_day_tem,
threshold = 38.99, minDuration = 3, joinAcrossGaps = FALSE, maxPadLength = 0)
exceedance_39_average = block_average(thresh39, x=t, y=max_day_tem)
```

```
#40 H threshold
```

```
thresh40 = exceedance(data = hmdx_ottmcdo2, x = t, y = max_day_tem,
threshold = 39.99, minDuration = 3, joinAcrossGaps = FALSE, maxPadLength = 0)
exceedance_40_average = block_average(thresh40, x=t, y=max_day_tem)
```

Création des graphiques

```
#rbind
```

```
exceedance_35_average$Seuil = '35'
exceedance_36_average$Seuil = '36'
exceedance_37_average$Seuil = '37'
exceedance_38_average$Seuil = '38'
exceedance_39_average$Seuil = '39'
exceedance_40_average$Seuil = '40'
```

```
all_exceedance = rbind(exceedance_35_average, exceedance_36_average,
exceedance_37_average, exceedance_38_average, exceedance_39_average,
exceedance_40_average)
colnames(all_exceedance)
```

```
all_exceedance <- all_exceedance %>%
  group_by(Seuil, year)
```

```
#Graphique pour la fréquence des VC selon les différents seuils
FVC = HW_freq(all_exceedance, "FPCA")
```

```
#Graphiques de distribution de la durée de la plus longue vague de chaleur  
DVC = HW_lenght(all_exceedance, "DPCA")
```

```
#Graphiques de l'intensité de la vague de chaleur la plus intense de l'année  
IVC = HW_intensity(all_exceedance, "IPCA")
```

```
#Nombre de journée total annuelle participant aux vagues de chaleur  
SVC = HW_days(all_exceedance, "SPCA")
```

```
#Nombre annuel de journées chaudes  
SJC = HW_heatdays(all_heatdays, "SJCA")
```

Imprimer les graphiques

```
FVC+theme(legend.position = "none")  
DVC+theme(legend.position = "none")  
SVC+theme(legend.position = "none")  
IVC+theme(legend.position = "none")  
SJC+theme(legend.position = "none")
```