

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

VAGUES DE CHALEUR: VARIABILITÉ HISTORIQUE ET CHANGEMENTS
FUTURS DANS LE SUD DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

LAETITIA CORALE

SEPTEMBRE 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Philippe Gachon pour le temps précieux qu'il m'a consacré tout au long de ces deux années de recherche, ses nombreux conseils et son investissement dans la réalisation d'un travail soigné et rigoureux. Je remercie également Guillaume Dueymes pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté dans l'élaboration de mes codes informatiques, pour sa contribution dans l'apport des bases de données sur lesquelles j'ai travaillé et le temps qu'il a pris à répondre à mes nombreuses questions.

Je voudrais remercier tous mes professeurs en science de l'atmosphère de l'UQAM pour leur enseignement, leur disponibilité et leur encouragement tout au long de ses années de maîtrise, et également tous les employés du centre ESCER, en particulier Georges Huard pour son aide dans tout ce qui attrait aux problèmes informatiques et à Adéline Alexandru pour son soutien, sa bonne humeur et son professionnalisme.

Enfin, j'aimerais remercier mes amis, en particulier Sara Ann Piscopo et Nicolas Jacquier, pour leur soutien, leur bonne humeur et l'ambiance réconfortante qu'ils m'ont apporté tout au long de ce projet. Et ma famille, qui malgré la distance ont toujours su me donner de bons conseils et me soutenir en toute circonstance.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET DES ACRONYMES.....	XV
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	XIX
RÉSUMÉ	XXI
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET ÉTATS DES CONNAISSANCES	5
1.1 Objectifs de l'étude et hypothèses de travail	5
1.1.1 Objectif principal.....	6
1.1.2 Objectifs spécifiques	6
1.1.3 Hypothèses de travail	7
1.2 Les impacts des périodes de forte chaleur	7
1.2.1 Effets des canicules sur la mortalité et la morbidité.....	7
1.2.2 Effets directs et indirects sur la santé et le bien-être des individus.....	8
1.2.3 Effets sur les écosystèmes naturels, le système économique ou alimentaire	12
1.3 Définition d'une canicule : de la simple alerte à la chaleur accablante à la prise en compte des effets sanitaires	13
1.3.1 Échelle météorologique.....	14
1.3.2 Échelle climatique	15
1.3.3 Basée sur les impacts sanitaires (en tenant compte des facteurs de vulnérabilité et/ou d'exposition)	16
1.4 Caractéristiques et évolution historique et future des canicules	18
1.4.1 Échelle globale	18
1.4.2 Au Canada et au Québec	19

CHAPITRE II: MÉTHODOLOGIE.....	23
2.1 Région d'étude : Sud du Québec.....	23
2.2 Données utilisées.....	24
2.2.1 Stations d'observation météorologique	24
2.2.2 Observations interpolées sur grille	26
2.2.3 Modèles régionaux du climat (MRCs)	26
2.3 Approche utilisée pour déterminer les canicules	30
2.3.1 Utilisation de l'approche de Météo France.....	30
2.3.2 Ajout du critère d'humidité (indice Humidex).....	33
2.4 Analyse diagnostique	36
2.4.1 Statistiques descriptives.....	36
2.4.2 Évaluation des tendances.....	37
2.4.3 Validation et comparaison des MRCs vs les observations	37
2.4.4 Évaluation des changements régionaux vs locaux (actuels vs futurs).....	40
CHAPITRE III: RÉSULTATS.....	51
3.1 Analyse de la variabilité historique des canicules.....	51
3.1.1 Évaluation à partir des données de stations	51
3.1.2 Évaluation des simulations de modèles climatiques régionaux.....	57
3.2 Analyse des changements futurs des canicules.....	60
3.2.1 Changement des Tmoy pour l'ensemble du domaine d'étude.....	60
3.2.2 Changements locaux des canicules.....	61
CHAPITRE IV: DISCUSSION.....	87
CHAPITRE V: CONCLUSION.....	91
ANNEXE A : MOYENNES CLIMATOLOGIQUES DES TMOY POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT CALCULÉES SUR LA PÉRIODE DE 1981 À 2010 À PARTIR DES DONNÉES ANUSPLIN ET DU MODÈLE CRCM5 PILOTÉ ERA-INTERIM UTILISANT DIFFÉRENTES RÉOLUTIONS (0,11°,0,22° ET 0,44°)..	95
ANNEXE B : DIAGRAMME À BULLE POUR LES DIFFÉRENTES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES, PÉRIODE CLIMATOLOGIQUE : 1981-2010.....	96
ANNEXE C : MOYENNES CLIMATOLOGIQUES DES TMOY POUR LES MOIS JUIN, JUILLET ET AOÛT POUR LES PÉRIODES FUTURES DE 2041-2070 ET 2071-2100 À PARTIR DES MOYENNES D'ENSEMBLE ISSUES DES MODÈLES RÉGIONAUX PILOTÉS PAR LES MODÈLES GLOBAUX DU CLIMAT	97
RÉFÉRENCES	98

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 2.1 Topographie du Sud-Est du Canada (en m, panneau de gauche) et localisation de la région d'étude (panneau de droite) représentée par un rectangle noir dans le panneau de gauche. Dans le panneau de droite, l'emplacement des stations météorologiques (Montréal McTavish, Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme) est inclus (dont les coordonnées géographiques sont fournies au Tableau 2.1).	43
Figure 2.2 Topographie du Sud du Québec provenant du MRCC5 à différentes résolutions horizontales (0,11 ° panneau de gauche, 0,22 ° panneau du milieu, et 0,44 ° panneau de droite). L'altitude et la position des principaux reliefs (Laurentides et Appalaches), vallée du St-Laurent et vallée du Lac Champlain-Richelieu (située entre les Montagnes Vertes et Blanches) sont incluses dans chaque panneau.	44
Figure 2.3 Principe d'identification d'une vague de chaleur ; exemple de la canicule de juillet 2010 pour la station de Montréal McTavish. Les différents seuils, Spic, Sdeb et Sint (99,5 ^e , 97,5 ^e et 95 ^e centiles des Tmoy, respectivement) sont calculés à partir de la valeur des Tmoy sur la période de référence (1981 à 2015) pour les mois de mai à septembre. La vague de chaleur est détectée dès lors que la Tmoy dépasse le 99,5 ^e centile (Spic = courbe bleue). La durée doit être supérieure ou égale à 3 jours consécutifs. Le début de la canicule correspond au premier jour où la Tmoy a dépassé le 97,5 ^e centile (Sdeb = courbe noire). La fin de la canicule est déterminée au jour où la Tmoy redescend en dessous de Sdeb, de façon durable, dès lors que la Tmoy < 95 ^e centile (Sint = courbe noire pointillé). Trois paramètres servent à caractériser les canicules : la température maximale (TM, °C), la durée de l'épisode caniculaire en jour (axe des abscisses) et l'indice de sévérité de la vague de chaleur, soit l'aire sous la courbe au-dessus de Sdeb (en gris foncé).	45
Figure 2.4 Détection des vagues de chaleur durant l'été 2010 pour les mois MJJAS (Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre) à la station Montréal McTavish, en utilisant a) les Tmoy quotidiennes et b) la moyenne mobile sur 3 jours des Tmoy quotidiens. Les seuils Spic, Sdeb et Sint sont respectivement représentés	

- par la ligne bleue, noire et en pointillé. Les T_{moy} (en °C) sont représentées sur l'axe des ordonnées, la durée en jour est représentée sur l'axe des abscisses et la sévérité est l'aire représentée en grise foncée.46
- Figure 2.5 Exemple d'une boîte à moustache (box et whisker plots) avec Q1 le premier quartile (Q1, soit le 25^e centile), Q2 le deuxième quartile (médiane, soit le 50^e centile), Q3 le troisième quartile (Q3, soit le 75^e centile). L'intervalle interquartile ($IQR = Q3 - Q1$), et les valeurs inférieures et supérieures au 1,5 IQR sont les « outliers » qui seront représentées par des croix rouges dans figures présentées au chapitre 3.....47
- Figure 2.6 Exemple de graphique à bulle présentant les caractéristiques des vagues de chaleur pour une série de données couvrant la période de 1980 à 2015, selon les critères de durée et d'intensité maximale (TM_n). La taille de chaque bulle est proportionnelle à l'indice de sévérité (selon l'évaluation de l'aire sous la courbe, cf. Figure 2.3). La bulle orange représente la vague de chaleur ayant l'intensité la plus élevée, la bulle rouge représente la vague de chaleur la plus sévère et la bulle bleue représente la canicule ayant durée le plus longtemps...
.....48
- Figure 2.7 Exemple de graphique à bulle des 10^e, 50^e et 90^e centiles des durées (en jours), des TM (en °C) et des sévérités des canicules observées durant la période historique (1951-2005, bulle grise) et simulées dans les conditions futures (2041-2070 et 2071-2100; bulle rose). La bulle jaune représente la canicule la plus sévère observée durant la période de 1981 à 2015 à la station de référence.49
- Figure 3.1 Boîtes à moustache de la distribution statistique des T_{moy} mensuelles pour les mois de juin à août, calculés sur une période de 30 ans (1981 à 2010) pour les stations de Montréal McTavish, Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme. Le nom de chaque station est indiqué sur l'axe des abscisses et les températures moyennes quotidiennes (en °C) sont représentées sur l'axe des ordonnées. La localisation de ces stations est présentée à la Figure 2.1.....67
- Figure 3.2 Vagues de chaleur détectées pour la station Montréal McTavish sur la période de 1870 à 2015. L'axe des ordonnées représente l'indice d'intensité maximale, l'axe des abscisses représente la durée en jour, la taille des bulles représente la sévérité d'une vague de chaleur et la couleur des bulles correspond à l'année.....68
- Figure 3.3 Différentes caractéristiques des vagues de chaleur pour la station Montréal McTavish pour la période de 1870 à 2015. Le panneau a) présente l'évolution du nombre de vagues de chaleur par décennies, et les panneaux b), c) et d) présentent, respectivement, les boîtes à moustache des durées (en jour) par

- décennie, des sévérités par décennie et de la température moyenne maximale (en °C) par décennie. 69
- Figure 3.4 Histogramme des années où l'on a détecté une vague de chaleur aux différentes stations météorologiques (Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, St-Jérôme et Lennoxville) pour la période de 1981 à 2010. 70
- Figure 3.5 Évolution du nombre de vagues de chaleur pour les différentes stations météorologiques (Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme) par décennie de 1980 à 2009 Les décennies sont représentées sur l'axe des abscisses et le nombre de vagues de chaleur est représenté sur l'axe des ordonnées. 70
- Figure 3.6 Identification des 10^e, 50^e et 90^e centiles des paramètres des vagues de chaleur pour les différentes stations (McTavish, Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme) pour la période de 1981 à 2010. Les 10^e centiles (bulle rose très claire), 50^e centiles (bulle rose claire) et les 90^e centiles (bulle rose foncée) de la TM, de la durée et de la sévérité des vagues de chaleur sont représentés. L'axe des abscisses représente la durée en jour et l'axe des ordonnées représente les températures moyennes maximales en degrés Celsius. La sévérité est associée à la grosseur de la bulle. 71
- Figure 3.7 Biais moyens (MRCC5 – ANUSPLIN, en °C) des T_{moy} climatiques mensuelles des mois de juin à août calculés pour la période de 1981 à 2010, en utilisant les trois résolutions du MRCC5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM à 0,11 °, 0,22 ° et 0,44 °. La région est la même que celle présentée à la Figure 2.1. 72
- Figure 3.8 Vagues de chaleur détectées pour les données de grille (ANUSPLIN et modèle MRCC5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM selon 3 résolutions à 10, 20 et 50 km) sur la période de 1981 à 2010. L'axe des ordonnées correspond à l'indice d'intensité maximale, l'axe des abscisses représente la durée en jour, la taille des bulles représente la sévérité d'une vague de chaleur et la couleur des bulles correspond à l'année. 73
- Figure 3.9 Identification des 10^e, 50^e et 90^e centiles des paramètres des vagues de chaleur pour les données de grille (ANUSPLIN et modèle CRCM5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM selon 3 résolutions à 10, 20 et 50 km) pour la période de 1981 à 2010. Les 10^e centiles (bulle rose très claire), 50^e centiles (bulle rose claire) et les 90^e centiles (bulle rose foncée) des TM, de la durée et de la sévérité des vagues de chaleur sont représentés. L'axe des abscisses correspond à la durée en jour et l'axe des ordonnées représente les températures moyennes maximales en °C. La sévérité est associée à la grosseur de la bulle. 74

- Figure 3.10 Histogramme des années où l'on a détecté une vague de chaleur à Montréal McTavish et celle détectée à partir des données ANUSPLIN et du modèle CRCM5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM aux trois résolutions (10 km, 20 km et 50 km) pour la période de 1981 à 2010.....75
- Figure 3.11 Boîtes à moustache de la distribution des T_{moy} des mois de juin à août sur une période commune de 1980 à 2005. Les T_{moy} sont calculées à partir de quatre points de grille autour de Montréal McTavish moyennés pour les données ANUSPLIN, du modèle MRCC5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM (3 résolutions) et des modèles régionaux pilotés avec les MGCs. Les données ANUSPLIN correspondent aux données de référence (ligne noire correspond à la médiane calculée à partir des données ANUSPLIN).....76
- Figure 3.12 Anomalies interannuelles de 2011 à 2100 (par rapport à la période de référence 1971-2000) des T_{moy} pour les mois de juin, juillet et août (pour les quatre points de grille autour de Montréal McTavish pour a) le scénario RCP4.5, et b) le scénario RCP8.5. Dans chacun des panneaux, la ligne bleu/rouge foncée correspond à la moyenne d'ensemble des 6 RCMs (présentés au Tableau 2.2), et les zones ou intervalles bleu/rouge représentent les valeurs maximales ou minimales obtenues parmi les six modèles utilisés.....77
- Figure 3.13 Évolution des 10^e, 50^e et 90^e centiles des caractéristiques des vagues de chaleur pour chaque modèle et pour chaque période future, a) 2041-2070 et b) 2071-2100, pour les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par rapport aux valeurs pour la période historique. Les bulles grises représentent les vagues de chaleur historiques, les bulles roses représentent les vagues de chaleur futures et la bulle jaune représente la vague de chaleur 2010. Les 10^e centiles (bulle très claire) représentent la valeur du 10^e centile en termes de T_M , de durée et de sévérité, les 50^e centiles (bulle claire) représentent la valeur médiane et les 90^e centiles (bulle foncée) représentent la valeur du 90^e centile des paramètres (T_M , de durée et de sévérité). L'axe des abscisses représente la durée (en jour) et l'axe des ordonnées représente les T_M (en °C). La sévérité est associée à la grosseur de la bulle.....79
- Figure 3.14 Idem Figure 3.13 mais en ajoutant l'indice Humidex pour la sévérité. ...81
- Figure 3.15 Évolution décennale de la T_{moy} maximale par décennie (en °C) des mois de mai à septembre pour les différents modèles régionaux pilotés en mode MGCs sur la période historique (1950-1999, panneau du haut) et les périodes actuelles et futures (2000-2100) pour les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (panneaux du milieu et du bas, respectivement).82
- Figure 3.16 Idem à la Figure 3.15 mais pour la durée des canicules.....83
- Figure 3.17 Idem à la Figure 3.15 mais pour la sévérité des canicules.....84

Figure 3.18 Idem à la Figure 3.15 mais pour l'intensité des canicules.	85
Figure 3.19 Idem à la Figure 3.15 mais pour le nombre de canicules et en utilisant les séries observées de 1870 à 2015 pour la station de Montréal McTavish.....	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 2.1 Liste des stations météorologiques d'Environnement et Changement Climatique Canada utilisées dans notre étude avec le numéro d'identification, la latitude, la longitude, l'altitude et les années de début et de fin des séries quotidiennes de températures (Tmin et Tmax) disponibles pour chaque station.	25
Tableau 2.2 Liste des modèles climatiques régionaux (MRCs) pilotés par différents modèles climatiques globaux (MGCs) utilisés dans notre étude. Ces simulations de MRCs sur l'Amérique du Nord sont issues du projet CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment ; Mearns <i>et al.</i> , 2013). Les principales caractéristiques de chaque modèle sont présentées (nom du MRC, institution responsable de son développement, et le nom des MGCs utilisés aux frontières). Toutes ces simulations utilisent une résolution de 0,44° (soit environ 50 km), et couvre la période historique 1951-2005 et future de 2006 à 2100 en utilisant les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Moss <i>et al.</i> , 2010 ; van Vuuren <i>et al.</i> , 2011).	29
Tableau 3.1 Comparaison des valeurs de Sdeb, Spic et Sint (correspondant au 95 ^e , 97,5 ^e et 99,5 ^e centiles du Tmoy, respectivement) pour les différentes stations (présentées au Tableau 2.1) par rapport aux seuils de Tmoy (Tmax et Tmin) utilisés selon les différentes régions socio sanitaires dans l'étude de Chebana <i>et al.</i> (2013). Ces comparaisons sont réalisées à partir des données quotidiennes de Tmoy couvrant la période de référence de 1981 à 2010.....	53
Tableau 3.2 Tendances significatives au seuil de 90 % (P-value < 0,1) pour chacun des mois de juin à août, calculées sur la période de 1981 à 2010 (en °C/an), pour les variables de températures (Tmoy, Tmax et Tmin) quotidiennes. Pour la plupart des mois, les tendances sont non statistiquement significatives (NS : Non Significative au seuil de 90 %)..	54

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET DES ACRONYMES

ANUSPLIN	Australian National University SPLINes
BEH	Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire
CanESM2	The second generation of Canadian Earth System Model
CanRCM4	Modèle Régional du Climat Canadien de 4 ^e génération
CCHST	Centre Canadien d'Hygiène et de Sécurité au Travail
CCCma	Canadian Centre for Climate modelling and analysis
CNES	Centre National d'Étude Spatiale
CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
DMI	Danish Meteorological Institute
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EC-EARTH	European community Earth-System Model
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA	ECMWF Re-Analysis
ESM-LR	Earth System Model- Low Resolution

GEM	Global Environmental Multiscale model
ICHEC	Irish Centre for High End Computing
ICU	Ilots de Chaleur Urbain
INRS	Institut National de la Recherche Scientifique
INSPQ	Institut National de Santé Publique du Québec
INVS	Institut National de Veille Sanitaire
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MGC	Modèle Global du Climat
MRC	Modèle Régional du Climat
MRCC	Modèle Régional Canadien du Climat
MRCC5	Modèle Régional Canadien du Climat de 5 ^e génération
MPI-M	Max Planck Institut for Meteorology
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS	National Weather Service
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
RCP	Representative Concentration Pathway
RSS	Région Socio Sanitaire
SAIC	Systèmes d'Avertissement et d'Intervention en cas de Chaleur

Sdeb	Seuil de début (97,5 ^e centile de la distribution statistique)
Sint	Seuil d'interruption (95 ^e centile de la distribution statistique)
Spic	Seuil pic (99,5 ^e centile de la distribution statistique)
SMHI	Swedish Hydrologic and Meteorological Institute
Tmax	Température maximale quotidienne
Tmin	Température minimale quotidienne
Tmoy	Température moyenne quotidienne
TM	Température moyenne maximale
TMn	Indice d'intensité maximale ou intensité maximale
UQAM	Université du Québec à Montréal
UTCI	Universal Thermal Climate Index
WMO	World Meteorological Organization

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

°C degrés Celsius

°O degrés Ouest

°N degrés Nord

% pourcentage

hPa hectoPascal

Km kilomètre

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif d'évaluer la distribution régionale des canicules dans le Sud du Québec en tenant compte des conditions climatiques actuelles et futures afin de mieux anticiper les changements futurs dans la sévérité et l'occurrence des vagues de chaleur au Québec et les impacts potentiels. Une approche multicritère, basée sur une méthode développée par Météo-France, est utilisée pour définir et caractériser une canicule selon quatre critères; la durée, l'intensité maximale, la sévérité et l'indice Humidex. La détection des canicules est basée sur les seuils de températures moyennes quotidiennes (99,5^e, 97,5^e et 95^e centiles) afin de développer une analyse flexible des canicules sur le territoire. Ces seuils se comparent à ceux basés sur les impacts sanitaires suggérés par l'institut national de santé publique du Québec. La canicule de 2010 qui fut une des plus intenses au Québec est analysée à partir des données de stations météorologiques, de valeurs observées interpolées sous forme de grille et de modèles régionaux pilotés par des réanalyses. Les modèles régionaux, pilotés aux frontières latérales par des modèles globaux, projettent, dans 50 % des cas, des vagues de chaleur de la même sévérité que celle de 2010 et dans 10 % des cas, des vagues de chaleur de 3 à 6 fois (RCP4.5) voire de 10 à 20 fois (RCP8.5) plus sévères que la vague de chaleur de 2010 à la fin du XXI^e siècle. Le nombre de vagues de chaleur doublerait (RCP4.5) / quadruplerait (RCP8.5) à la fin du siècle par rapport au début du siècle d'après les simulations de modèles utilisées.

Mots clés : Vague de chaleur, canicule, multicritère, Québec, sévérité, centiles, Humidex.

INTRODUCTION

Les dernières décennies (depuis les années 70s en particulier) sont considérées comme la période où les températures moyennes annuelles ont été les plus élevées depuis 1 400 ans à la surface du globe (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2013). Dans le même temps, une augmentation du nombre de vagues de chaleur a été observée à travers le monde (Coumou et Rahmstorf, 2012). Certaines de ces vagues de chaleur ont notamment été d'une intensité exceptionnelle, comme celles observées en Europe en 2003, en Australie en 2009, en Russie en 2010 ou encore aux États-Unis en 2012 (World Meteorological Organization - WMO, 2015 ; Institut National de Veille Sanitaire - INVS, 2017). Cette recrudescence des vagues de chaleur est associée à des températures estivales extrêmes plus élevées dans un contexte de réchauffement climatique qui s'accélère au cours des cinquante dernières années (Betts *et al.*, 2011 ; Hansen *et al.*, 2012 ; Coumou *et al.*, 2013 ; Coumou et Robinson, 2013). En effet, ceci est à mettre en lien direct avec l'influence humaine grandissante sur le climat (Jones *et al.*, 2008 ; Stott *et al.*, 2011), soit un forçage radiatif positif de plus en plus sensible à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Plusieurs études ont également mis en évidence l'augmentation des températures de l'air au printemps à l'échelle globale (Keeling *et al.*, 1996 ; Myneni *et al.*, 1997 ; Christidis *et al.*, 2007 ; Walther *et al.*, 2002 ; Root *et al.*, 2003). Les températures plus élevées augmentent de façon plus rapide et perdurent sur une durée plus longue qu'auparavant en début de saison estivale.

Les canicules sont le quatrième des désastres naturels après les sécheresses, les inondations et les cyclones tropicaux qui engendrent des effets sanitaires majeurs (décès et problèmes de santé ; WMO, 2015). Ces extrêmes de température ont un

impact direct sur la santé humaine selon leur fréquence, leur intensité et leur répartition géographique (Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire - BEH, 2012). Elles sont responsables de nombreuses maladies (exemple : insuffisance cardiaque, hypertension artérielle) et entraînent des seuils de mortalité et de morbidité plus élevés (exemple : 55 000 morts durant la canicule de l'été 2010 en Russie). Les populations principalement touchées sont les personnes âgées et les enfants, les fortes températures limitant leur capacité de thermorégulation du corps (Ellis *et al.*, 1975 ; Bridger *et al.*, 1976). Ceci est d'autant plus préoccupant alors qu'on s'attend à une augmentation du taux de réchauffement au cours des prochaines décennies, soit de 0,3 à 0,7 °C pour la température moyenne quotidienne (T_{moy}) à la surface du globe pour la période de 2016 à 2035 par rapport à la période de 1986 à 2005 (IPCC, 2013). Dans ce contexte, les canicules augmenteront en intensité et en fréquence dans le futur entraînant une vulnérabilité plus élevée et une adaptation plus difficile des sociétés et des écosystèmes (IPCC, 2013).

Au Canada, le réchauffement à l'échelle annuelle était d'environ 1,6 °C pour la période de 1948 à 2013 (Environnement et Changement Climatique Canada - ECCC, 2016), soit environ le double de la tendance à l'échelle globale pour la même période (ECCC, 2016). Les modèles globaux du climat projettent une hausse de la température moyenne annuelle pour le Canada de 3/5 °C d'ici 2046 à 2065 par rapport à la période de 1986 à 2005 selon les deux scénarios de forçage radiatif RCP4.5/RCP8.5 (Representative Concentration Pathway - RCP ; IPCC, 2013).

Ce travail a pour objectif d'évaluer la distribution régionale des risques de canicules dans le sud du Québec, dans les conditions climatiques actuelles et futures, afin de mieux anticiper les impacts sanitaires potentiels (facteurs d'exposition sur le territoire). Pour cela, plusieurs critères sont utilisés afin d'identifier et de caractériser une vague de chaleur à partir de la durée, de l'intensité maximale (TM_n), de la sévérité et de l'indice Humidex (basé sur l'humidité relative de l'air). L'intensité maximale et la

sévérité sont deux critères multivariés basés à la fois sur les températures maximales, la durée et les seuils d'identification de l'épisode caniculaire (Sdeb soit le Seuil de début ou 97,5^e centile, et Spic le Seuil Pic ou 99,5^e centile). L'élaboration de ces critères multivariés sont plus pertinents que les analyses ou l'usage de critères univariés et permet de définir une vague de chaleur : 1) en tenant compte des conditions climatiques et météorologiques actuelles de la région d'étude ; 2) de prendre en compte l'effet du réchauffement climatique ; et 3) d'établir des critères en se basant sur les impacts sanitaires. De plus, aucune étude sur les vagues de chaleur au Canada n'a développé une méthode se basant sur des critères multivariés. Cette méthode a été développée en France et notre étude inclut l'indice Humidex, qui n'avait pas été considéré dans la méthode française.

Le chapitre I présente l'état des connaissances sur les canicules, leurs effets sur les populations exposées et vulnérables face à la chaleur accablante et les objectifs de cette étude. Le chapitre II contient une description de la méthodologie, de la région d'étude et des données utilisées, alors que le chapitre III présente les résultats sur la variabilité et les changements dans les caractéristiques des canicules. Les chapitres IV et V présentent, respectivement, la discussion et la conclusion.

CHAPITRE I

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET ÉTATS DES CONNAISSANCES

1.1 Objectifs de l'étude et hypothèses de travail

Notre étude se base sur une nouvelle méthode de détection des vagues de chaleur mise au point par Météo-France. Elle utilise trois seuils (relatifs) prédéfinis comme étant les centiles de la distribution des T_{moy} quotidiennes qui permettent d'identifier l'épisode caniculaire. La méthode proposée par Météo-France calcule les centiles sur l'année entière (de janvier à décembre), tandis que cette étude se base sur le calcul de centile des mois de mai à septembre. Cette méthode est applicable quel que soit les séries de températures, période temporelle et régions étudiées présentant ou pas des caractéristiques thermiques différentes. Ainsi, comme elle utilise un seuil relatif basé sur les centiles (et non pas sur un seuil absolu), elle considère le caractère variable du climat d'une région à l'autre et permet de détecter des vagues de chaleur selon les conditions météorologiques du lieu. D'autre part, l'approche multicritère avec un indice de sévérité permet de combiner à la fois la durée et l'intensité des températures élevées. Cet indice, encore jamais utilisé au Canada, répond au besoin de combiner l'information sur les valeurs élevées de températures dans le temps pour faciliter son utilisation dans le domaine sanitaire. Dans notre cas, cette méthode sera établie sur les données d'observations puis utilisée à partir des simulations de modèles régionaux du climat, afin de développer une information sur l'intensité, la durée et la sévérité, en considérant un troisième critère basé sur l'humidité relative de l'air (indice Humidex),

considéré comme un facteur aggravant les problèmes sanitaires associés aux fortes chaleurs. Les études précédentes au Canada se sont basées, dans la plupart des cas (exemple : Casati *et al.*, 2003), sur des seuils fixés en termes de durée et d'intensité ne reposant pas sur les impacts sanitaires. Ainsi, notre méthode permettra de développer une information détaillée basée sur quatre critères d'identification des vagues de chaleur, et permettra sur cette base de déterminer comment les épisodes caniculaires évolueront dans le futur par rapport aux conditions actuelles.

1.1.1 Objectif principal

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer la distribution régionale des risques de canicules dans le sud du Québec, dans les conditions climatiques actuelles et futures, afin de mieux anticiper les impacts sanitaires potentiels (facteurs d'exposition sur le territoire).

1.1.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de notre étude sont les suivants :

- Développer une approche multicritère permettant de caractériser la sévérité des canicules, fonction de la durée et de l'intensité de la vague de chaleur ;
- Définir une méthode flexible, qui prend en compte le contexte spatial et temporel de la région d'étude, et répondant aux applications basées sur les impacts sanitaires potentiels à l'échelle locale ;
- Utiliser les projections régionales des canicules issues des simulations du projet NA-CORDEX (Composante Nord-Américaine du projet COordinated Regional climate Downscaling EXperiment ; Mearns *et al.*, 2013) afin

d'évaluer à l'échelle régionale et locale les changements futurs dans la sévérité et l'occurrence des vagues de chaleur au Québec.

1.1.3 Hypothèses de travail

L'utilisation des centiles de la distribution des températures moyennes quotidiennes dans le calcul des seuils est considérée adéquate et/ou se rapproche des seuils basés sur les impacts sanitaires (tels que ceux suggérés par l'INSPQ - Institut National de Santé Publique du Québec, et l'INRS - Institut National de la Recherche Scientifique-été; Chebana et al., 2013). Ceci permet d'utiliser une définition relative aux conditions climatiques du lieu (approche régionale) et de transposer et d'appliquer une approche développée dans un autre contexte climatique (climat tempéré de la France).

Les seuils utilisés pour les projections futures seront basés sur les seuils calculés à partir des données historiques, en supposant que le degré de vulnérabilité et d'exposition des populations dans le futur aux températures extrêmes sera le même qu'aujourd'hui.

1.2 Les impacts des périodes de forte chaleur

1.2.1 Effets des canicules sur la mortalité et la morbidité

Les canicules sont responsables d'un grand nombre de décès à travers le monde. Par exemple, la vague de chaleur de 2003 en France engendra 17 000 décès entre le 4 et le 18 août directement en lien avec les fortes chaleurs (INVS, 2017), de même que la canicule de 2010 au sud du Québec occasionna une surmortalité de 106 décès pour la seule ville de Montréal. Les épisodes de chaleur extrême, comme les autres aléas naturels, causent davantage de dommages aux populations particulièrement vulnérables et exposées, notamment les personnes qui présentent des problèmes de

santé ou qui vivent dans les conditions socio-économiques plus précaires que la majorité de la population (IPCC, 2012). En effet, la nature et la gravité des impacts d'un extrême climatique dépendent du phénomène lui-même, mais aussi de l'exposition et de la vulnérabilité face au danger (IPCC, 2012). Les aléas climatiques, l'exposition et la vulnérabilité sont influencés par de nombreux facteurs, dont le changement climatique d'origine anthropique, la variabilité naturelle du climat et le développement socio-économique (IPCC, 2012). Un aléa météorologique ou climatique est un phénomène qui engendre des impacts indésirables, parfois des dommages de grande ampleur, et perturbe gravement le fonctionnement normal d'une population ou d'une société (IPCC, 2012). La vulnérabilité correspond à la propension ou la prédisposition d'un système naturel ou humain à subir des dommages (IPCC, 2012). L'exposition est la présence d'individus, de moyens de subsistance, de ressources et de services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu susceptible de subir des dommages (IPCC, 2012). Une population ayant de faibles revenus et donc une incapacité à pouvoir se munir de moyens matériels ou d'une infrastructure permettant de se protéger des fortes chaleurs, aura du mal à s'adapter et sera donc plus exposée aux fortes chaleurs.

Afin d'atténuer voire d'éviter les effets préjudiciables sur la santé, il est important de mettre en place des plans sectoriels, des programmes de développement internationaux et d'adopter des stratégies d'adaptation au changement climatique, en s'assurant que ces mesures se fassent de façons concrètes dans des secteurs et au bénéfice des groupes de populations les plus vulnérables (IPCC, 2012).

1.2.2 Effets directs et indirects sur la santé et le bien-être des individus

Les décès occasionnés durant une canicule ne découlent pas nécessairement directement des fortes chaleurs, mais des maladies engendrées durant et après l'exposition des populations à des températures très élevées. Les maladies, qui peuvent

être exacerbées lors des épisodes de chaleur ambiante extrême, principalement meurtrières sont l'hypertension artérielle, le diabète, l'insuffisance cardiaque, la schizophrénie, l'éthylisme ou encore la toxicomanie (Matthies *et al.*, 2008). Lors de la vague de chaleur de 2010 à Montréal, les décès observés étaient, dans 55 % des cas, causés par des facteurs de risque cardiovasculaire (maladie coronarienne, insuffisance cardiaque ou l'hypertension artérielle) et, dans 31 % des cas, causés par des maladies reliées à la santé mentale, dont 13 % d'entre elles seraient des problèmes de schizophrénie (Roy *et al.*, 2011). En outre, plusieurs études, basées sur l'analyse de la morbidité et de la mortalité durant les vagues de chaleur, ont permis d'identifier les groupes de populations les plus vulnérables. Parmi ceux-ci, on retrouve les personnes âgées (Kenny *et al.*, 2010), les nourrissons et les jeunes enfants (Bridger *et al.*, 1976), les personnes atteintes de maladies chroniques (troubles psychiatriques) ou ayant une déficience physique (Bouchama *et al.*, 2007), des personnes défavorisées sur le plan social (Naughton *et al.*, 2002) et des personnes qui travaillent dans des secteurs exposés directement à la chaleur ambiante tels que la construction, l'agriculture, etc. (Centre Canadien d'Hygiène et de Sécurité au Travail - CCHST, 2005). Cependant, ce sont les personnes âgées, les enfants et les personnes atteintes de maladies cardiaques qui sont les plus affectés durant les fortes chaleurs. La capacité de l'organisme à s'acclimater devient plus limitée pour ce type de population (Ellis *et al.*, 1975 ; Bridger *et al.*, 1976). En outre, les périodes de forte chaleur peuvent être accompagnées de facteurs susceptibles de nuire à la thermorégulation du corps humain ou à des facteurs aggravant les problèmes sanitaires (Grubenhoff *et al.*, 2007), comme par exemple, une augmentation de la pollution atmosphérique, la formation d'îlot de chaleur urbain, ou encore, des conditions de forte humidité (facteur qui sera pris en compte dans cette étude).

1.2.2.1 Pollution atmosphérique

Les conditions synoptiques propices à l'apparition d'une canicule sont également le plus souvent favorables à l'occurrence de pics de pollution reliés à l'ozone. Durant l'été 2003 en France, la ville de Paris a connu un pic de pollution élevée d'ozone et de dioxyde d'azote (Bessemoulin *et al.*, 2004). De même au Québec, la canicule de 2010 a été accompagnée par une pollution atmosphérique due principalement aux particules fines, à l'ozone et au smog (Psychomédia, 8 juillet 2010). Au Canada, les vagues de chaleur sont souvent accompagnées de smog, caractérisé par une concentration élevée en polluants atmosphériques. Ces polluants sont à l'origine de maladies respiratoires et cardiovasculaires (Organisation Mondiale de la Santé - OMS, 2002 ; Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 2007). Ces conditions de pollution atmosphérique augmentent le risque de problèmes sanitaires lors des épisodes caniculaires. Une étude faite sur l'est des États-Unis et du Canada pour la période de 1999 à 2013 basée sur les observations de l'ozone près de la surface et des particules fines définies comme les aérosols de diamètre $\leq 2,5 \mu\text{m}$, révèle que des épisodes de fortes pollutions se combinent lors des épisodes caniculaires apparaissant à grande échelle (Schnell et Prather, 2017). Ces travaux ont montré que les valeurs d'ozone, de particules fines et de Tmax (Température maximale quotidienne), dépassant le seuil de référence de + 7 ppb, + $6 \mu\text{g m}^{-3}$ et de + 1,7 °C, respectivement, se combinent lors des événements de chaleur accablante (Schnell et Prather, 2017).

1.2.2.2 Îlots de chaleur urbain (ICU)

En milieu urbain, le problème de chaleur accablante est fortement accentué à cause de la formation des « Îlots de Chaleur Urbain (ICU) ». En effet, la température de l'air en milieu urbain peut différer substantiellement de la température en milieu rural. Cet effet

d'ICU est causé par l'emmagasinement de la chaleur durant le jour par certains matériaux de surface (comme le béton, le bitume, etc.), puis la restitution de cette chaleur accumulée durant la nuit. En outre, le rapport de Bowen, qui correspond au rapport entre le flux de chaleur sensible (conduction ou convection de chaleur depuis la surface vers l'atmosphère ou inversement) et le flux de chaleur latente (relié à l'évaporation de l'eau en surface), est de 0,2 environ dans les zones de production agricole irriguée, de 0,5 dans les champs d'herbes, et supérieur à 0,7 en régions urbaines (Chapitre 3, p.74-75, Stull, 2015). Les mesures prises à partir de valeurs observées à la ville de Montréal donnent une valeur de 0,75 (Oke et Fuggle, 1972 ; Yap et Oke, 1974). Ceci est directement relié au fait que les surfaces végétalisées sont plus réduites et les sols « artificiellement » plus imperméabilisés en milieu urbain qu'en campagne, limitant ainsi l'infiltration de l'eau et l'accumulation de l'eau dans le sol. Le résultat est de favoriser des températures de surface plus élevées en ville qu'en campagne (et des flux de chaleur sensible depuis la surface qui favorisent le réchauffement de l'air sus-jacent), en raison du plus faible taux d'évaporation dans les surfaces urbanisées que dans les zones naturelles. Dans ces dernières, le processus d'évaporation peut refroidir la température de surface et limiter ainsi l'accroissement des températures de l'air sus-jacent durant le jour (Oke, 1982, et 1997). Ces différences dans les conditions de stress thermique entre les zones urbaines et rurales affectent d'autant plus les populations vulnérables, tant d'un point de vue social que physique (Kovats et Hajat, 2008 ; Smargiassi *et al.*, 2009), alors que celles-ci se retrouvent majoritairement dans les zones urbaines dont la densité d'habitation est élevée et non pas accès à des systèmes de climatisation.

1.2.2.3 Conditions d'humidité relative élevée

Les vagues de chaleur peuvent être accompagnées par un taux d'humidité de l'air élevé (Bessemoulin *et al.*, 2004). Au Québec ou dans l'est de l'Amérique du Nord en général,

les fortes valeurs d'humidité de l'air durant les chaleurs intenses entraînent un inconfort supplémentaire. Une chaleur humide sera d'autant plus difficile à supporter qu'une chaleur sèche (Laaidi *et al.*, 2012). Le corps humain doit en effet maintenir une température interne d'environ 37 °C en rétablissant constamment l'équilibre entre l'apport en chaleur et la perte de chaleur. Un fort taux d'humidité relative de l'air ambiant empêche une évaporation de la sueur du corps de façon efficace, ce qui limite la capacité de thermorégulation et le refroidissement cutané (Grubenhoff *et al.*, 2007) via l'enthalpie de changement d'état lors de l'évaporation de l'eau. C'est pourquoi, dans des régions où les vagues de chaleur sont accompagnées d'un taux d'humidité de l'air élevé, comme l'Ontario ou le sud du Québec, il est considéré comme un facteur aggravant lors des chaleurs accablantes vis-à-vis de la santé des populations (Chebana *et al.*, 2013). Masterson et Richardson (1979) ont défini un indice Humidex, qui combine la température de l'air et la pression de vapeur d'eau de l'air (ou l'humidité spécifique). ECCC utilise les valeurs d'Humidex afin de renseigner le public lorsque les conditions de chaleur et d'humidité deviennent ou risquent d'être inconfortables. En France, une étude a mis en place un index température-humidité (THI), utilisé pour quantifier le degré de stress à chaleur (Morignat *et al.*, 2015). Cet indice sera utilisé dans notre étude afin de tenir compte de l'humidité de l'air dans l'identification et la caractérisation des canicules. Le calcul de cet indice est détaillé à la section 2.3.3 du chapitre II.

1.2.3 Effets sur les écosystèmes naturels, le système économique ou alimentaire

La canicule de 2003 en France fut associée à une forte sécheresse qui a affecté l'état de la végétation en ralentissant l'activité photosynthétique. L'activité végétale et l'évapotranspiration des forêts ont été fortement réduites, associées entre autres à la perte de surface foliaire et au manque d'eau. Durant cette période, les arbres sont devenus plus vulnérables aux maladies et au stress provoqué par les insectes (Centre

National d'Étude Spatiale - CNES, Communiqué de presse, 23 septembre 2003). De plus, durant les fortes chaleurs, les exigences accrues en eau et en électricité peuvent entraîner des pénuries voire des pannes d'électricité (WMO, 2015). De même, les rendements des cultures sont affectés et l'état de santé du bétail peut être gravement affaibli lors des fortes chaleurs, causant des problèmes parfois substantiels dans la sécurité alimentaire (WMO, 2015).

1.3 Définition d'une canicule : de la simple alerte à la chaleur accablante à la prise en compte des effets sanitaires

Il n'existe aucune définition universelle pour caractériser une canicule, de même, aucun consensus terminologique n'a été mis en place afin de définir un épisode de temps chaud (Gachon *et al.*, 2016). Tous les événements caniculaires, que ce soit par leur étendue et leur intensité, varient considérablement d'une région à l'autre (Stefanon *et al.*, 2012), les conditions météorologiques et climatiques pouvant entraîner ou non un événement caniculaire étant différentes selon la région (WMO, 2015). Un événement caniculaire peut se manifester à la fois dans des lieux où le climat d'été est très variable, mais également dans des régions où l'on observe une faible variabilité intra-saisonnière durant la saison estivale. Les canicules résultent d'une large gamme de situations météorologiques à grande échelle et de mécanismes ou de processus locaux pouvant affectés le climat d'une région (Changnon *et al.*, 1996 ; Palecki *et al.*, 2001 ; Choi et Meentemeyer, 2002 ; Zaitchik *et al.*, 2006 ; Pezza *et al.*, 2012). À certaines occasions, la combinaison de certains facteurs inhabituels de l'état de l'océan et de conditions atmosphériques ou de la surface terrestre peut engendrer, à court terme, l'apparition de caractéristiques de température et d'humidité parfois considérées comme extrêmes (WMO, 2015). En Asie du Sud ou en Afrique sahélienne, les vagues de chaleur se produisent le plus souvent avant la saison estivale juste avant l'arrivée de la mousson (WMO, 2015). Cependant, dans la majorité des cas, une vague de chaleur apparaît à la suite de la formation d'un blocage atmosphérique. Ce dernier est associé à des systèmes

de haute pression persistants, stationnaires et d'échelle synoptique, qui interrompent la circulation atmosphérique habituelle aux moyennes et hautes latitudes (IPCC, 2013). Le blocage de la circulation atmosphérique entraîne un même type de temps (ex. Anticyclone ou dépression quasi-stationnaire) pendant plusieurs jours et par conséquent engendre des anomalies climatiques sur les régions affectées (NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, 2015). Ce phénomène, quasi-stationnaire, peut avoir un impact sur les conditions météorologiques ou climatiques de surface et est généralement associé à des anomalies dans les précipitations (excès ou pénurie), ce qui peut occasionner des sécheresses (Carrera *et al.*, 2004). Dans notre cas, les blocages qui se situent dans l'est du Pacifique et dans l'Atlantique peuvent provoquer des anomalies de températures positives sur le Nord et le Nord-Est du Canada (Meucci, 2016).

Les définitions proposées pour les canicules varient selon les applications basées sur des échelles météorologiques (plusieurs jours à plusieurs semaines) ou climatiques (mensuelle à multi décennale). En outre, les modèles du climat ne sont pas toujours en mesure de reproduire des événements météorologiques soit en raison d'un manque de résolution temporelle et spatiale ou encore en raison de certains paramétrages qui ne peuvent représenter les processus régionaux ou locaux (exemple : nature de la surface qui diffère en milieu urbain et rural).

1.3.1 Échelle météorologique

Les définitions se basent le plus souvent sur des valeurs ou des seuils de Tmax et Tmin (Température minimal quotidienne; critère d'intensité) prédéfinies selon un critère de durée, pouvant aller de 3 à 6 jours. Par exemple, Météo-France définit une vague de chaleur à partir de seuils propres à chaque département, dans un cas spécifique une vague de chaleur se définit comme trois jours consécutifs ou plus où les Tmin sont au-dessus de 20 °C et les Tmax sont supérieures à 33 °C (Laaïdi *et al.*, 2012). Le National

Weather Service (NWS) aux États-Unis détermine une canicule comme une période de deux jours ou plus de temps anormalement chaud, humide et inconfortable, basée sur les données des stations météorologiques des températures maximales quotidiennes issues de la NOAA (NOAA, 2015). Au Québec, le terme « vague de chaleur » est défini, par l'INSPQ, comme une période de trois jours consécutifs où la Tmax est supérieure ou égale à 33 °C, la Tmin est supérieure ou égale à 20 °C et l'indice Humidex est supérieur ou égal à 40 dans le sud du Québec (Chebana *et al.*, 2013). Cette étude propose une définition qui se base sur les liens canicules et mortalité/ morbidité, établis selon la région socio-sanitaire.

1.3.2 Échelle climatique

En ce qui a trait aux échelles climatiques, les vagues de chaleur sont le plus souvent définies selon l'occurrence de valeurs quotidiennes de températures dépassant des seuils absolus ou relatifs en fonction d'une durée qui varie selon la région d'étude (Gachon *et al.*, 2016). Selon ces critères, différentes définitions de vagues de chaleur peuvent être établies. L'étude de Frich *et al.* (2002), par exemple, considère l'apparition d'une canicule dès lors que les seuils absolus de Tmax dépassent de 3 à 5 °C la moyenne climatique saisonnière de référence, sur une durée d'au moins trois à six jours consécutifs (Frich *et al.*, 2002). D'autres études définissent un épisode caniculaire comme le dépassement de seuils relatifs de Tmax basé sur des valeurs du 90^e centile (Zacharias *et al.*, 2014) de la valeur climatologique de référence, et en utilisant un critère de durée d'au moins trois à six jours (Gachon *et al.*, 2016 ; Smith *et al.*, 2013). La WMO propose de définir une vague de chaleur comme une période consécutive de plus de six jours où la Tmax est supérieure au 90^e centile de référence (par exemple établie selon la normale 1961-1990 ; Warm Spell Duration Index ; Klein Tank *et al.*, 2009). En France, une nouvelle méthode a été élaborée par Météo-France en utilisant trois seuils permettant d'identifier l'épisode caniculaire. Les T_{mo}y seuil au-delà duquel

un évènement est détecté (Spic ou le 99,5^e centile), le seuil qui définit le début et la fin de la canicule (Sdeb ou le 97,5^e centile) et le seuil d'interruption (Sint qui est le Seuil d'interruption ou le 95^e centile ; Ouzeau *et al.*, 2016). Cette méthode sera employée dans le présent travail et sera détaillée dans la section 2.3.1 du chapitre II.

1.3.3 Basée sur les impacts sanitaires (en tenant compte des facteurs de vulnérabilité et/ou d'exposition)

Au Québec, les seuils de détection ont été établis par l'INRS-ETE et l'INSPQ en 2009, à partir d'une analyse faite sur la mortalité historique (1981-2005) en lien avec la température. Les valeurs seuils de température ont été établies à partir d'une évaluation quantitative des hausses significatives de mortalité lors des périodes de temps chaud (60 % par rapport à la moyenne historique Martel *et al.*, 2010 ; Chebana *et al.*, 2013). Les seuils établis varient en fonction des Régions Socio-Sanitaires (RSS) du Québec découpées en trois classes : La classe 1 (Bas-Saint-Laurent, Saguenay, Capitale Nationale, Abitibi-Témiscamingue, Côte-Nord, Nord-du-Québec et Gaspé) avec des seuils de Tmax de 31 °C et de Tmin de 16 °C ; la classe 2 (Mauricie, centre du Québec, Estrie, Outaouais, Chaudière-Appalaches, Parc du Mont-Tremblant et Mont-Laurier) avec des seuils de Tmax de 31 °C et de Tmin de 19 °C ; et la classe 3 (Montréal, Lanaudière, Laurentides, Saint-Jérôme et Montérégie) avec des seuils de Tmax de 33 °C et de Tmin de 20 °C (Martel *et al.*, 2010). L'étude de Chebana *et al.* (2013) a montré qu'il est important d'utiliser des seuils flexibles sur le territoire canadien, contenu du fait que les conditions climatiques et météorologiques sont très diversifiées et varient considérablement d'une région à l'autre (Gachon *et al.*, 2016). D'autre part, d'autres études ont montré que l'utilisation d'une moyenne pondérée sur trois jours consécutifs des températures prévues permet d'améliorer les systèmes de vigilance visant la réduction du nombre de décès durant les fortes chaleurs, et d'éviter également les fausses alertes (Martel *et al.*, 2010 ; Chebana *et al.*, 2013) Les moyennes pondérées de température permettent en outre de tenir compte des incertitudes inhérentes à la

prévision météorologique quant à la véracité des valeurs de températures anticipées (Gachon *et al.*, 2016).

Des méthodes équivalentes ont également été utilisées en France, notamment dans le but d'établir des seuils basés sur les centiles associés à une surmortalité, en prenant les Tmax et Tmin moyennées sur trois jours consécutifs, en utilisant les principales périodes de surmortalité observées au cours des années de 1973 à 2003 (Pascal *et al.*, 2013). En Allemagne, une analyse a quant à elle été réalisée sur l'impact des canicules sur la cardiopathie ischémique humaine (pathologie qui affecte les artères coronaires) vis-à-vis de la mortalité observée au cours des années de 2001 à 2010. On y définit une canicule comme une période d'au moins trois jours consécutifs avec un Tmoy dépassant le 97,5^e centile de la distribution de température de référence (Zacharias *et al.*, 2014).

En résumé, les vagues de chaleur sont définies par leur intensité, qui dépend des seuils absolus ou relatifs de Tmax, Tmin et Tmoy, et par leur durée (3 ou 6 jours consécutifs et plus). Comme leur occurrence et leur caractéristique varient selon la région d'étude et la période de l'année, il est souvent difficile d'établir une définition universelle. En outre, leur impact sur la santé humaine varie selon le degré de vulnérabilité et d'exposition des populations, et le degré d'adaptation des populations. Ceci rend également difficile une généralisation des définitions basées sur les impacts sanitaires sans une étude préalable des liens mortalité/mortalité et des seuils de températures, ainsi que tenant compte de la durée des épisodes de fortes températures selon le contexte démographique et socio-économique. En effet, les premières vagues de chaleur qui surviennent au début de l'été peuvent engendrer de plus grandes pertes ou problèmes de santé humaine qu'une vague de chaleur qui survient à la fin de la saison d'été, parce que notre organisme n'est pas adapté aux fortes températures en début de saison estivale (Chebana *et al.*, 2013). D'autres facteurs peuvent entrer en ligne de compte, notamment des facteurs dits « aggravants » comme les températures nocturnes

élevées (exemple : en ville en raison de la présence des ICU), l'humidité de l'air et la pollution atmosphérique. Certaines définitions en tiennent compte, notamment en incluant le facteur Humidex (exemple : lors des alertes de temps chauds au Canada faites par ECCC).

1.4 Caractéristiques et évolution historique et future des canicules

1.4.1 Échelle globale

La température annuelle moyenne du globe a augmenté de 0,85 °C durant la période de 1880 à 2012 (IPCC, 2013). Globalement, les extrêmes de températures ont également connu des changements significatifs, avec une augmentation de la fréquence des journées les plus chaudes et des vagues de chaleur, et une diminution des journées les plus froides à l'échelle globale (IPCC, 2013). Dans ce contexte, des canicules exceptionnelles ont été observées un peu partout sur le globe au cours des dernières décennies, certaines étant d'une ampleur jamais observée dans les séries historiques disponibles. Par exemple, la canicule de 2003 en France a été exceptionnelle par ses Tmax qui se sont maintenues entre 36 °C et 37 °C du 5 au 13 août, et notamment des Tmin de plus de 3,5 °C au-dessus de la moyenne climatique de 1950 à 1980 (INVS, 2004). Des études ont permis d'attribuer cette vague de chaleur aux changements climatiques d'origine anthropique (Schär et Jendritzky, 2004 ; Alvarez-Castro *et al.*, 2016). De même, la vague de chaleur qu'a connue la Russie en 2010 a été classée comme la pire qu'ait connue le pays depuis les 130 dernières années (Russo *et al.*, 2014). D'autres vagues de chaleur ont été particulièrement notables, comme celle de 1994 en Allemagne, de 2007 en Grèce et de 2011 et 2012 aux États-Unis (Russo *et al.*, 2014). L'année 2012 fut une année de catastrophes climatiques pour les États-Unis, les températures moyennes annuelles ayant été de 1,78 °C plus élevées que la moyenne du XX^e siècle, soit de 0,56 °C de plus que le précédent record établi en 1998 (NOAA,

2013). En 2012, les températures ont excédé les 37,7 °C durant 10 jours et le 11 juillet, la température en Arizona atteint les 49,4 °C (NOAA, 2013). En résumé, entre 2002 et 2012, le nombre de vagues de chaleur avec une forte sévérité a été trois fois plus élevé que celles observées au cours de la période de 1991 à 2001 à l'échelle globale (Russo *et al.*, 2014).

De nombreuses études réalisées à partir des simulations des modèles globaux du climat (MGC) ont étudié l'évolution des vagues de chaleur dans les conditions futures, notamment celles qui sont les plus létales pour l'être humain (IPCC, 2012 ; IPCC, 2014). Plusieurs ont concerné les zones tropicales où les fortes chaleurs s'accompagnent d'un taux d'humidité élevé (Mora *et al.*, 2017). D'après cette même étude, l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre provoquerait une augmentation de 3,7 °C de la température moyenne annuelle globale d'ici 2100 par rapport à la période de 1980 à 2014, entraînant des vagues de chaleur potentiellement mortelles plus de 300 jours dans des zones comme l'Indonésie, les Philippines, le Nord du Brésil, le Venezuela, le Sri Lanka, le Sud de l'Inde, le Nigéria et la plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest (Mora *et al.*, 2017). De même, Washington pourrait faire face à des vagues de chaleur meurtrières entre 15 et 85 jours par an si la hausse des températures moyennes globales se situe entre 2 et 3,7 °C (Mora *et al.*, 2017). Des villes comme Miami ou Hong-Kong pourraient être exposées à des vagues de chaleur entre 80 à 140 jours par an, avec une hausse de seulement 2 °C de la température moyenne annuelle globale (Mora *et al.*, 2017). Les préoccupations quant aux risques de décès reliés à une chaleur plus intense et durable dans le futur sont donc majeures.

1.4.2 Au Canada et au Québec

Au cours des dernières décennies, le réchauffement climatique a également affecté la plupart des régions du Canada (ECCC, 2016). La température moyenne annuelle au Canada a augmenté de 1,5 °C de 1950 à 2010 (Vincent *et al.*, 2012), soit plus du double

de la tendance à l'échelle globale (ECCC, 2016). Les T_{min} ont augmenté de façon plus importante que les T_{max}, soit respectivement de 1,7 °C et 1,4 °C en 61 ans, les températures les plus élevées ont été observées au cours des années 2010, 2006 et 1998 (Vincent *et al.*, 2012). Les tendances annuelles des T_{min} et des T_{max} ont augmenté de 0,3 à 3 °C selon la région considérée (Vincent *et al.*, 2012). Les années entre 2000 et 2017 représentent les mois d'été avec les températures les plus élevées, alors que les T_{mo} à l'échelle du pays ont augmenté de 1,5 °C au cours des 70 dernières années (ECCC, 2017).

À Montréal, les T_{mo} des mois d'été ont quant à elles augmenté de 1,4 °C depuis le début du XX^e siècle, soit au cours de la période de 1900 à 2013 (ECCC, 2016). Plusieurs canicules majeures ont été observées au cours des dernières décennies à travers le Canada, notamment celle durant le mois de juillet 2010, qui a affecté le Sud du Québec et l'Ontario et dont l'ampleur fut exceptionnelle (Bustinza *et al.*, 2013). En effet, la température et l'humidité de l'air furent extrêmement élevées. Les T_{max} dépassèrent les 33 °C durant plusieurs jours avec des valeurs d'indice Humidex variant de 35 à 45 selon certains secteurs, notamment dans la vallée du Saint-Laurent et de la Montérégie (Gachon *et al.*, 2016). Les T_{min} se sont maintenues au-dessus des 20 °C durant 5 jours pour la ville de Montréal et 3 jours pour la ville de Toronto (Gachon *et al.*, 2016). Cette vague de chaleur entraîna une hausse de 33 % de la mortalité et une augmentation des admissions dans huit centres de santé du Québec (Bustinza *et al.*, 2013). Montréal compta parmi les principales agglomérations touchées avec les plus hautes valeurs de T_{max} (> 34 °C) et de T_{min} (24 °C) observées (McGeehin et Mirabelli, 2001). Pour la période de 1981 à 2010, en utilisant les définitions des vagues de chaleur dès lors que les T_{max} dépassent de plus de 3 °C la moyenne saisonnière sur trois jours consécutifs, on observe un nombre de vagues de chaleur qui varient entre 2 à 4 canicules par saison (juin, juillet, août ; Gachon *et al.*, 2016). Pour le Sud du Québec, les vagues de chaleur varient entre 3 à 4 vagues de chaleur par saison sur la même période (1981 à 2010 ; Gachon *et al.*, 2016).

D'après les simulations d'ensemble de tous les MGCs participant au projet CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5), le Québec pourrait connaître une augmentation de 1,9/2,8 °C des Tmoy en été au cours de l'horizon 2046 à 2065, et de 2,6/5,3 °C pour l'horizon 2081 à 2100 avec le scénario RCP4.5/RCP8.5 (ECCC, 2016). Les RCPs fournissent les scénarios futurs plausibles quant à l'évolution du forçage anthropique pouvant aller d'un scénario à faibles émissions caractérisé par une atténuation active (RCP2.6) à deux scénarios intermédiaires (RCP4.5 et RCP6), jusqu'à un scénario à émission élevée (RCP8.5) (Moss *et al.*, 2010 ; van Vuuren *et al.*, 2011). Dans ce contexte, plusieurs études estiment le nombre de vagues de chaleur dans le futur :

- Pour la période de 2040 à 2069, certains Modèles Régionaux du Climat (MRCs) pilotés par quatre Modèles de la Circulation Générale Atmosphère-Océan (MCGAO) projettent une augmentation en moyenne de 2 canicules par an par rapport à la période de 1970 à 1999 avec une augmentation maximale de 15 vagues de chaleur par an pour le secteur des Grands Lacs dans l'Est du Canada (comprenant la ville de Montréal ; Jeong *et al.*, 2016). Cette étude définit une vague de chaleur comme une période de trois jours consécutifs où les Tmax sont supérieures à 32 °C (Jeong *et al.*, 2016).
- Pour la période de 2071 à 2100, les projections de température du MRCC (Modèle Régional du Climat Canadien) prévoient en moyenne (pour les villes du Manitoba, Toronto, Ottawa, Montréal, Winnipeg, Hamilton, Windsor, Kingston et Fredericton) un nombre de jours par an avec un Tmax supérieure à 30 °C qui doublerait voire triplerait par rapport à 1951-2000 (passant de 40 à 60 jours par an par rapport à un nombre de 10 à 20 jours par an respectivement ; Casati *et al.*, 2013).

L'étude de Benmarhnia *et al.* (2014) a utilisé 32 simulations dérivées de trois MGCs et d'un MRCC comprenant trois ensembles de risques relatifs, permettant de prévoir la

mortalité attribuable aux températures (T_{min} , T_{max} et T_{moy} supérieures à 15 °C, 20 °C et 20 °C respectivement) passées (1990-2007) et futures (2020-2037) pour les mois de juin à août. Les simulations projettent un nombre de décès attribuables aux températures estivales de 62 décès par été entre 1990 et 2007 et de 34 à 174 décès par été pour la période de 2020 à 2037 (Benmarhnia *et al.*, 2014).

En définitive, dans un contexte de réchauffement climatique et d'une augmentation de la population et de l'urbanisation, il devient primordial de définir les niveaux de risques liés à la sévérité future des canicules à des échelles régionales, voire à l'échelle des communautés. Ceci est en effet nécessaire afin de contribuer à mettre en place des moyens d'adaptation efficace et viable, et réduire les effets délétères des canicules dans le futur.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Région d'étude : Sud du Québec

La région étudiée est le sud du Québec où l'on analysera les vagues de chaleur pour les villes de Montréal, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et Saint-Jérôme (cf. Figure 2.1) et plus particulièrement les vagues de chaleur autour de quatre points de grille (de MRC, cf. section 2.2) fixés autour de Montréal McTavish (Latitudes de 45 à 47°N, longitudes de 71 à 76°O).

Le sud du Québec est l'une des régions du Canada, avec la Colombie-Britannique (en particulier Vancouver, vallée du Fraser, baie Howe, Whistler et Sunshine Coast), le sud de l'Alberta et l'Ontario, où l'on retrouve le plus grand nombre d'évènements caniculaires durant la période d'été (juin à août) avec des Tmax parmi les plus élevées du Canada (Vincent *et al.*, 2012 ; Gachon *et al.*, 2016). Au sud du Québec, les moyennes climatologiques mensuelles (période 1981 à 2010) des Tmax varient entre 24 et 26 °C pour le mois de juin, et entre 25 et 28 °C pour les mois de juillet et août, respectivement (Gachon *et al.*, 2016). Les vagues de chaleur (avec des Tmax > 30 °C et des Tmin > 20 °C) s'observent moins d'une fois par saison estivale (Khaliq *et al.*, 2007) en moyenne (Gachon *et al.*, 2016). Aussi, il est possible d'observer des Tmax au nord du Québec qui dépassent ces seuils de détection pour le Tmax, mais les températures nocturnes ne sont, le plus souvent, pas assez élevées pour faire perdurer un épisode de forte chaleur.

L'Annexe A représente les moyennes climatologiques des T_{moy} pour les mois de juin, juillet et août à partir des données de grille ANUSPLIN (Australian National University SPLINes) et du modèle MRCC5 aux trois résolutions ($0,11^\circ$, $0,22^\circ$ et $0,44^\circ$) pour la région d'étude. Les T_{moy} varient entre 11 et 18 °C pour le mois de juin, entre 13 et 23 °C pour le mois de juillet et entre 12 et 22 °C pour le mois d'août. Malgré le fait que l'on retrouve principalement les températures les plus élevées durant les mois de juin, juillet et août, il peut arriver que les T_{moy} des mois de mai ou septembre atteignent les conditions caniculaires (exemple : du 24 au 27 septembre 2017 les T_{moy} se sont maintenues entre 24,4 et 26,1 °C ; ECCC, 2018a). C'est pourquoi, les seuils de détection seront calculés à partir des mois de mai à septembre et les vagues de chaleur seront détectées sur cette même période dans les conditions historiques et futures.

2.2 Données utilisées

2.2.1 Stations d'observation météorologique

Les données de T_{max} et T_{min} quotidiennes issues des valeurs homogénéisées obtenues à partir des séries observées des stations d'ECCC (Environnement et Changement climatique Canada ; présentées au Tableau 2.1) seront utilisées. Ces données homogénéisées ont été élaborées afin d'obtenir des séries quotidiennes et mensuelles les plus fiables possibles (ex : pour l'analyse des tendances climatiques) en éliminant les effets des changements dans l'emplacement des stations ou dans les instruments, pour 338 stations à travers le Canada. Elles sont issues des données de deuxième génération de températures homogénéisées (Vincent *et al.*, 2012). L'homogénéisation des données permet d'éviter les fausses tendances liées aux changements dans les instruments et comble certaines valeurs manquantes. Une étude basée sur des modèles de régression ont relevé des variations dans les moyennes annuelles des températures journalières minimales et maximales dues au déplacement de la station, à des

changements dans les pratiques d'observation et à l'automatisation (Vincent et Gullett, 1999). Des ajustements ont été faits en fonction des variations relevées pour les températures mensuelles et journalières minimales et maximales (Vincent *et al.*, 2002). La liste des stations météorologiques a été modifiée afin d'y inclure les stations qui possèdent des données d'observation de températures qui couvrent le plus grand nombre possible d'années récentes (Vincent *et al.*, 2012). Le Tableau 2.1 présente les stations météorologiques utilisées dans cette étude : Montréal McTavish, Montréal Dorval, La Tuque, Les Cèdres, Lennoxville et Saint-Jérôme. Ces stations correspondent aux stations du sud du Québec, avec les séries les plus complètes, où les températures peuvent parfois être supérieures à 30 °C durant la saison d'été. Les températures à la station Montréal McTavish sont plus élevées qu'à Montréal Dorval, qui est proche du lac Saint-Louis, mais également à cause des ICU (cf. 1.1.3 du Chapitre I) fréquents en centre-ville de Montréal (cf. Gachon *et al.*, 2016). La période de temps commune pour la détection des vagues de chaleur est celle de 1981 à 2010 pour toutes les stations, et de 1870 à 2015 pour l'analyse spécifique des vagues de chaleur sur une plus longue période de temps pour la station de Montréal McTavish.

Tableau 2.1 Liste des stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada utilisées dans notre étude avec le numéro d'identification, la latitude, la longitude, l'altitude et les années de début et de fin des séries quotidiennes de températures (Tmin et Tmax) disponibles pour chaque station.

Nom de station	Numéro d'identification	Latitude (°N)	Longitude (°O)	Altitude (m)	Année début	Année fin
Montréal McTavish	7024740	45,47	73,75	73	1871	2017
Montréal Dorval	7025251	45,45	73,74	36	1913	2017
Les Cèdres	7014290	45,3	74,05	47	1913	2017
La Tuque	707DBD4	47,4	72,78	169	1911	2017
Lennoxville	7024280	45,37	71,82	181	1915	2017
St-Jérôme	7037400	45,8	74,05	170	1932	2017

2.2.2 Observations interpolées sur grille

Les données observées interpolées sur grille à partir de données d'observation de station d'ECCC, provenant de la technique d'interpolation ANUSPLIN (Hutchinson *et al.*, 2009), couvrent la zone continentale du Canada jusqu'à 60 °N et comprennent des séries quotidiennes de Tmax et Tmin disponibles sur la période 1961 à 2010 (McKenney *et al.*, 2011). Ces variables sont interpolées sur une grille utilisant une projection Lambert conique conforme à environ 10 km de résolution. La latitude, la longitude et l'élévation de la station sont traitées comme des variables indépendantes. Les données interpolées d'ANUSPLIN ont été utilisées à plusieurs reprises pour la validation des modèles MRCs sur le Canada (cf. Eum *et al.*, 2012 ; Diaconescu *et al.*, 2016), elles constituent une base de données relativement fiables pour la validation des modèles et permettent d'obtenir une bonne représentation des conditions climatiques régionales au Canada (en particulier des températures). La méthode d'interpolation spatiale utilisée est basée sur des algorithmes de lissage par plan affiné (Hutchinson *et al.*, 2009 ; Hopkinson *et al.*, 2011 ; McKenzie *et al.*, 2011) en tenant compte de la topographie. Pour cette étude, les données utilisées sont les Tmax et Tmin quotidiennes couvrant la période de 1981 à 2010. On calcule la Tmoy quotidienne à partir des Tmax et des Tmin ($T_{moy} = (T_{max} + T_{min})/2$).

2.2.3 Modèles régionaux du climat (MRCs)

2.2.3.1 MRCs pilotés en mode réanalyse

Le Modèle Régional du Climat Canadien de cinquième génération (MRCC5 ; Hernández-Díaz *et al.*, 2013 ; Laprise *et al.*, 2013 ; Martynov *et al.*, 2013 ; Šeparović *et al.*, 2013), utilisant les réanalyses ERA-INTERIM (ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - Re-Analysis ; Dee *et al.*, 2011) comme données

aux frontières latérales, est utilisé à trois résolutions horizontales différentes (0,11 °, 0,22 ° et 0,44 °). La dynamique du modèle est une version à aire limitée provenant du modèle global GEM (Global Environmental Multiscale model ; Côté *et al.*, 1998 ; Yeh *et al.*, 2002) utilisé pour la prévision numérique du temps à ECCO. L'utilisation des trois résolutions historiques dans notre étude permettra d'évaluer entre autres, l'effet de l'augmentation de la résolution sur la simulation des Tmoy (calculées à partir des Tmax et Tmin quotidiennes comme pour les données observées et ANUSPLIN) et sur les canicules simulées, sachant qu'une meilleure définition des effets topographiques (cf. Figure 2.2) dans le MRCC5 améliore potentiellement la simulation des variables près de la surface (cf. Cholette *et al.*, 2015).

2.2.3.2 MRCs pilotés en mode MGCs

L'ensemble NA-CORDEX (Mearns *et al.*, 2017) est la composante Nord-Américaine du projet international CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) qui a pour objectifs principaux de : 1) développer des scénarios climatiques à l'échelle régionale et évaluer les impacts associés ; 2) développer une meilleure compréhension des phénomènes climatiques régionaux, leur variabilité et leurs changements, grâce à la réduction d'échelle ; 3) produire des ensembles coordonnés de projections régionales sur différents continents ; et 4) favoriser la communication et l'échange de connaissances avec les utilisateurs de l'information climatique régionale (World Climate Research Programme - WCRP, 2018). En France, la composante européenne du projet CORDEX, EURO-CORDEX, a permis de mieux représenter des phénomènes locaux et d'événements extrêmes comme les vagues de chaleur que l'usage courant des MGCs (CNRS, Communiqués de presse, 2013). Ce projet a également contribué à la réalisation de projections climatiques pour le XXI^e siècle avec une plus haute résolution spatiale que celle fournie par les modèles globaux du climat (CNRS, communiqués de presse, 2013).

Pour notre étude, plusieurs simulations utilisant quatre MRCs issus du projet NA-CORDEX (Mearns *et al.*, 2017) sont utilisées et présentées au Tableau 2.2. Celles-ci sont à une résolution de $0,44^\circ$ et utilisent différents modèles climatiques globaux aux frontières (CCCma-CanESM2, ICHEC-EC-EARTH et MPI-M-MPI-ESM-LR) et deux scénarios de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5 ; van Vuuren *et al.*, 2011).

Les variables utilisées sont les Tmax et les Tmin quotidiennes et l'humidité relative quotidienne à partir desquelles les caractéristiques de canicules seront calculées (en climat actuel et futur) sur la zone d'étude fixée autour de la station de Montréal McTavish (quatre points de grille aux latitudes de 45° à 47° N, et aux longitudes de 71° à 76° O). Les simulations sur le climat historique correspondent à six séries de simulations issues des différents modèles (présentés au Tableau 2.2) couvrant la période de 1951 à 2005. Les simulations futures regroupent 12 simulations couvrant la période 2010 à 2100 utilisant deux scénarios RCPs (RCP4.5 et RCP8.5). Les RCPs fournissent les scénarios futurs plausibles quant à l'évolution du forçage anthropique pouvant aller d'un scénario à faible émission caractérisé par une atténuation active jusqu'à un scénario à émission élevée (Moss *et al.*, 2010 ; van Vuuren *et al.*, 2011). Le scénario RCP4.5 est représenté par une augmentation de la concentration de CO₂ (dioxyde de carbone) dans l'atmosphère avec une stabilisation et le scénario RCP8.5 est représenté comme une hausse constante de CO₂ dans l'atmosphère et est attribué au scénario de forte émission (ce qui entraîne des différences considérables dans l'évolution future des canicules entre les deux scénarios). Pour cette étude nous analyserons les périodes de 2041-2070 et 2071-2100 par rapport à la période de référence de 1951 à 2005, que ce soit autour de Montréal ou plus généralement dans le sud du Québec (cartes fournies en annexe).

Tableau 2.2 Liste des modèles climatiques régionaux (MRCs) pilotés par différents modèles climatiques globaux (MGCs) utilisés dans notre étude. Ces simulations de MRCs sur l'Amérique du Nord sont issues du projet CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment ; Mearns *et al.*, 2013). Les principales caractéristiques de chaque modèle sont présentées (nom du MRC, institution responsable de son développement, et le nom des MGCs utilisés aux frontières). Toutes ces simulations utilisent une résolution de 0,44° (soit environ 50 km), et couvre la période historique 1951-2005 et future de 2006 à 2100 en utilisant les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Moss *et al.*, 2010 ; van Vuuren *et al.*, 2011).

Nom du modèle	MRCC5	HIRHAM5	RCA4	CanRCM4
Institution	Université du Québec à Montréal (UQAM), Canada	Danish Meteorological Institute (DMI), Danemark	Swedish Hydrologic and Meteorological Institute (SMHI), Suède	Centre Canadien pour la modélisation et l'analyse du climat, (CCmaC) Canada
Données aux frontières	CCCma-CanESM2 (1951-2005) (2006-2100)	ICHEC-EC-EARTH (1951-2005) (2006-2100)	CCCma-CanESM2 (1951-2005) (2006-2100)	CCCma-CanESM2 (1951-2005) (2006-2100)
	MPI-M-MPI-ESM-LR (1951-2005) (2006-2100)		ICHEC-EC-EARTH (1951-2005) (2006-2100)	
Résolution	0,44 ° (50 km)			
Scénarios	RCP4.5 et RCP8.5			

2.3 Approche utilisée pour déterminer les canicules

2.3.1 Utilisation de l'approche de Météo France

Notre approche est basée sur la méthode d'identification des vagues de chaleur développée par Météo-France (Ouzeau *et al.*, 2016). Cette méthode se base sur trois seuils: Spic (Seuil Pic ou 99,5^e centile du Tmoy), Sdeb (Seuil de début ou 97,5^e centile du Tmoy) et Sint (Seuil d'interruption ou 95^e centile du Tmoy) permettant de définir l'épisode caniculaire (cf. Figure 2.3). Ces seuils sont déterminés à partir des centiles de la distribution statistique des Tmoy quotidiennes disponibles, de mai à septembre, sur une période de 30 ans. Chacun des seuils selon la valeur des centiles (95^e, 97,5^e et 99,5^e centiles de la Tmoy) sert à déterminer le début, la durée et la fin des vagues de chaleur. On procède selon les deux étapes suivantes :

1. La vague de chaleur est tout d'abord détectée dès lors que la température moyenne quotidienne dépasse le 99,5^e centile (Spic, courbe bleue sur la Figure 2.3). Une fois ce critère rencontré, on poursuit l'investigation.
2. On identifie, ensuite, la durée de la canicule, qui doit être supérieure ou égale à trois jours consécutifs (critère de durée à rencontrer). Pour ce faire, le début doit correspondre à la première occurrence d'une température moyenne quotidienne ayant dépassée le 97,5^e centile (Sdeb, courbe noire continue sur la Figure 2.3), soit avant l'atteinte de la valeur Spic décrite précédemment. La fin de la canicule est ensuite déterminée le jour où la température moyenne quotidienne redescend en dessous de Sdeb de façon durable. Deux cas de figure peuvent alors se présenter :
 - a) La température passe en dessous du 95^e centile de la température moyenne quotidienne (Sint, courbe noire dans la Figure 2.3) et la canicule est interrompue (critère de fin de la période caniculaire).

- b) La température se maintient inférieure (<) à Sdeb mais supérieure (>) à Sint, pendant une journée ou deux maximums, puis remonte au-dessus de Sdeb, alors on considère cette journée ou ces deux jours comme faisant partie de la même canicule, telle que précédemment décelée.

Une fois les deux étapes d'identification de l'épisode de canicule réalisées, on détermine trois autres paramètres qui servent à la caractériser :

- La durée, telle que définie à l'étape 2 (décrite ci-dessus), en utilisant les seuils Sdeb et Sint.
- La température moyenne maximale (TM) atteinte durant la canicule sert à calculer l'indice d'intensité maximale (TMn). Celui-ci est déterminé à partir des valeurs de TM, Spic et Sdeb (l'indice TMn est défini à la section 2.3.1.2).

L'indice de sévérité combine la durée et l'intensité de la canicule selon les valeurs de Tmoy au-dessus de Sdeb (cet indice est défini à la section 2.3.1.3).

2.3.1.1 Moyenne mobile sur trois jours consécutifs

Dans notre région d'étude, les températures peuvent fluctuer parfois largement d'un jour à l'autre (variabilité intra-mensuelle importante au Québec, cf. Gachon *et al.*, 2016). Afin que les valeurs de Tmoy n'aient pas de fluctuations aléatoires ou fortement discontinues dans le temps, nous appliquons une moyenne mobile sur trois jours consécutifs, qui permet de filtrer ces fluctuations. Cette moyenne mobile de la Tmoy est calculée via la formule suivante :

$$\hat{T}moy_j = \frac{\bar{T}moy_{j+1} + \bar{T}moy_j + \bar{T}moy_{j-1}}{3} \quad (2.1)$$

Avec $\bar{T}moy_j$ la température moyenne du jour j , $\bar{T}moy_{j+1}$ la température moyenne du jour $j+1$ et $\bar{T}moy_{j-1}$ la température du jour $j-1$.

Cette étape permet de lisser les fluctuations des températures de jour en jour et de limiter les erreurs lorsque l'on applique la méthode des trapèzes pour le calcul de l'intégrale définie ci-dessous. De plus, le calcul de la moyenne mobile des T_{moy} évite également d'obtenir des diagnostics biaisés ou permet une meilleure détection des vagues de chaleur (cf. Figure 2.4).

2.3.1.2 Indice d'intensité maximale (TMn)

L'indice d'intensité maximale (TMn) est calculé de la manière suivante (Ouzeau *et al.*, 2016) :

$$TMn = \frac{TM \text{ de l'épisode} - C975}{(C995 - C975)} \quad (2.2)$$

Avec TM la température moyenne maximale atteinte durant la canicule, C975 le 97,5^e centile (Sdeb) et C995 le 99,5^e centile (Spic) du T_{moy} .

On obtient alors un indice d'intensité maximale ou intensité maximale dont l'échelle démarre à 1 (intensité minimale d'une vague de chaleur) lorsque TM est égale au 99,5^e centile de référence. TMn est supérieure à 1 lorsque $TM > 99,5^{\text{e}}$ centile de la T_{moy} .

2.3.1.3 Indice de sévérité

De même, on détermine un indice de sévérité, qui combine l'intensité et la durée de la vague de chaleur, soit la somme de tous les degrés au-dessus du 97,5^e centile (Sdeb) déterminés entre le début et la fin de l'épisode caniculaire.

En premier lieu, on détermine la somme de toutes les valeurs de T_{moy} au-dessus du 97,5^e centile durant l'épisode caniculaire en calculant l'intégrale ou l'aire sous la courbe (zone noire dans la Figure 2.3) déterminée par toutes les valeurs de T_{moy} ayant

dépassé Sdeb. Pour ce faire, on utilise la méthode des trapèzes. Le principe est d'assimiler une aire sous la courbe comme étant représentative d'une fonction f définie par un segment ($[a, b]$ étant le segment total et $[x_i, x_{i+1}]$ les différents segments pour les n trapèzes entre a et b ; cf. Figure 2.3) soit un trapèze, et d'en calculer l'aire Tn (Jedrzejewski, 2006) :

$$Tn = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n (f(x_i) + f(x_{i+1})) \quad (2.3)$$

Où $h = \frac{b-a}{n}$ avec a le jour de début de la vague de chaleur, b le jour de fin de la vague de chaleur. et n le nombre de trapèzes.

On somme tous les Tn pour obtenir la moyenne statistique qui représente l'aire totale sous la courbe, à partir du début et jusqu'à la fin de la vague de chaleur. A partir de là, l'indice de sévérité est calculé de la façon suivante (Ouzeau *et al.*, 2016) :

$$Sev_{temp} = \frac{Tn}{C99,5 - C97,5} \quad (2.4)$$

Avec $C97,5$ la valeur du 97,5^e centile (Sdeb) et $C99,5$ la valeur du 99,5^e centile (Spic) du $Tmoy$.

On obtient alors un indice de sévérité (appelé aussi, sévérité) dont l'échelle démarre à 1 (sévérité minimale d'une vague de chaleur) et augmente au-delà de 1 lorsque les $Tmoy$ sont supérieures au 99,5^e centile de référence durant plus de trois jours.

2.3.2 Ajout du critère d'humidité (indice Humidex)

Pour les simulations historiques et futures utilisant les MRCs, en plus des données de $Tmoy$, on utilise un indice Humidex quotidien (Masterson et Richardson, 1979). Ce

dernier combine, en une même valeur, l'humidité et la température permettant de refléter la température perçue par l'être humain. La forte humidité ambiante exacerbe les effets des températures élevées sur la morbidité et la mortalité (cf. Chebana *et al.*, 2013). Cet indice Humidex est calculé à partir des données d'humidité relative (déduite à partir des valeurs de pression partielle de vapeur d'eau ; cf. Gachon *et al.*, 2016) et de T_{moy} , pour chaque valeur observée ou simulée, de la façon suivante :

$$Humidex(H) = T_{moy} + \frac{5}{9}(e - 10) \quad (2.5)$$

Avec T_{moy} la température moyenne quotidienne de l'air (en °C) et e la pression partielle de vapeur d'eau (en hPa).

La pression partielle de vapeur peut être calculée en utilisant l'humidité relative HR et la pression de vapeur saturante e_{sat} :

$$e = \frac{HR}{100} \times e_{sat} \quad (2.6)$$

Par suite, on utilise une approximation polynomiale pour calculer la pression de vapeur saturante e_{sat} en hPa (Lowe, 1977) si la température de l'air est comprise entre -50 °C et +50 °C :

$$e_{sat} = a_0 + T_x \left(a_1 + T_x \left(a_2 + T_x \left(a_3 + T_x \left(a_4 + T_x \left(a_5 + T_x \times a_6 \right) \right) \right) \right) \right) \quad (2.7)$$

Où T_x est la température moyenne maximale

$$a_0 = 6,107799961$$

$$a_1 = 4,436518521 \times 10^{-1}$$

$$a_2 = 1,458945805 \times 10^{-2}$$

$$a_3 = 2,650648471 \times 10^{-4}$$

$$a_4 = 3,031240396 \times 10^{-6}$$

$$a_5 = 2,034080948 \times 10^{-8}$$

$$a_6 = 6,136820929 \times 10^{-11}$$

De la même façon que l'on a calculé l'indice de sévérité associé à la température, on calcule un indice de sévérité associé à l'indice Humidex, durant laquelle les conditions d'humidité ont dépassé les seuils S_{deb} , S_{pic} et S_{int} basés sur les valeurs quotidiennes de l'indice Humidex :

$$Sev_{humid} = \frac{Hn}{C_{99,5} - C_{97,5}} \quad (2.8)$$

Avec $C_{97,5}$ la valeur du 97,5^e centile (S_{deb}), $C_{99,5}$ la valeur du 99,5^e centile (S_{pic}) et Hn la somme de toutes les valeurs d'Humidex au-dessus du 97,5^e centile calculée de la même façon que Tn (équation 2.3) mais en utilisant les valeurs d'indice Humidex.

A partir de là, on peut calculer un indice de sévérité totale (Sev_{totale}), pour les mois de mai à septembre, qui additionne les effets de la température (Sev_{temp}) et de l'indice Humidex (Sev_{humid}) de la façon suivante :

$$Sev_{totale} = Sev_{temp} + Sev_{humid} \quad (2.9)$$

Les indices de canicules seront calculés à la fois à partir des séries de T_{moy} et d'indice Humidex quotidiens de valeurs observées (stations et données ANUSPLIN) et des simulations de MRCs sur les périodes historiques et futures (i.e. chaque série de variables fera l'objet de calcul d'indice de façon indépendante et les résultats de ces calculs seront comparés).

2.4 Analyse diagnostique

2.4.1 Statistiques descriptives

Les distributions statistiques des Tmoy quotidiennes seront analysées par mois (de mai à septembre) à l'aide de graphique de « box et whisker plots » ou « boîtes à moustaches » (cf. Figure 2.5). Ces représentations graphiques permettent d'évaluer la dispersion statistique d'une série de données et de mettre l'emphase sur plusieurs caractéristiques statistiques de celle-ci, soit nommément :

- Le premier quartile Q1, soit le 25^e centile de la distribution,
- La médiane (ou le deuxième quartile Q2, soit le 50^e centile),
- Le troisième quartile Q3, soit le 75^e centile,
- L'intervalle interquartile range IQR (Q3 – Q1), et
- Les « valeurs extrêmes ou exceptionnelles » qui dépassent les deux bornes inférieures et supérieures du 1,5 x IQR (cf. exemple dans Dibike *et al.*, 2008).

Ces représentations sous forme de boxplots seront réalisées à la fois à partir des données de stations, des données observées interpolées sur grille et des simulations de modèles. La comparaison des différents boxplots permettra, entre autres, d'évaluer la similarité/dissembance des données simulées avec les données observées, et de vérifier notamment la compatibilité des Tmoy utilisées comme critères pour identifier les canicules (cf. section 2.3.1). Les trois centiles seuils utilisés pour identifier et caractériser les canicules, soit le 95^e centile (Sint), le 97,5^e centile (Sdeb), et le 99,5^e centile (Spic), situés près ou à l'extérieur de la limite supérieure du 1,5 IQR, pourront donc être évalués graphiquement. Ils correspondent aux valeurs les plus extrêmes des Tmoy, soit les « queues chaudes » de la distribution statistique de cette variable.

2.4.2 Évaluation des tendances

Les tendances des T_{moy} , T_{max} et T_{min} , issues des données de stations météorologiques (Montréal McTavish, Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme), vont être déterminées afin d'étudier les changements significatifs dans les températures qui peuvent ou non coïncider avec des changements dans les canicules historiques. Ces tendances seront calculées sur la période de 1981 à 2010 pour les mois de juin à août (mois où les vagues de chaleur apparaissent le plus souvent). On considère qu'il y a une tendance lorsqu'elle est significative au seuil de 90 %, soit en utilisant un p -value $< 0,1$. Les deux méthodes utilisées sont les tests de Man-Kendall modifiés et une approche de « pre-whitening » (blanchiment) modifiée, qui tiennent compte de l'autocorrélation dans les séries temporelles et des phénomènes de persistance (Khaliq et Gachon, 2010).

2.4.3 Validation et comparaison des MRCs vs les observations

2.4.3.1 Comparaison entre les simulations et les observations sur grille et la station de Montréal McTavish

Afin d'évaluer les variations historiques des caractéristiques des canicules à partir des données de la station de Montréal McTavish et celles issues des données de grille (ANUSPLIN et MRCs) sur une période commune (1981-2010), une procédure de comparaison simple est établie. La comparaison des données de cette station d'observation avec les données de grille (ANUSPLIN et simulations de MRCs) est réalisée en utilisant la moyenne des quatre points de grille les plus proches de la station de Montréal McTavish. Comme on ne peut pas comparer une valeur ponctuelle (station) à une valeur simulée sur une surface (tuile du modèle), il est nécessaire d'utiliser au moins quatre voire plus de tuiles de modèle pour comparer les valeurs simulées aux valeurs observées à une station (cf. discussion dans l'étude de von Storch

et al., 1993). La comparaison entre les données de modèles et les données de la station de Montréal McTavish permettra de comparer la durée, la TM, l'intensité maximale (TMn), la sévérité et l'occurrence des canicules dans le temps, notamment celle de 2010 observée à Montréal en utilisant le modèle MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-INTERIM selon les différentes résolutions pour la période de 1981 à 2010.

À partir des critères de détection (Sdeb, Spic et Sint définis à la section 2.3.1) utilisés pour l'identification des caractéristiques des canicules (TMn, durée et indice de sévérité), un « graphique à bulles » sera utilisé (cf. Figure 2.6). Ce graphique permet d'identifier les années ou les périodes durant lesquelles les vagues de chaleur ont été les plus sévères en termes de sévérité, d'intensité et de durée.

Les boîtes à moustaches des distributions statistiques des Tmoy des données observées ou simulées sur grille (ANUSPLIN, MRCs pilotés ERA-INTERIM et MRCs pilotés MGCs) sur la période de 1980 à 2005 pour les mois de juin à août sont également présentés afin d'évaluer et de comparer les médianes, les quartiles et le 1,5 IQR des séries de données de température avec la station de Montréal en utilisant la moyenne des quatre points de grille autour de ce lieu.

2.4.3.2 Comparaison des modèles avec les données ANUSPLIN sur grille

Une comparaison et validation entre les valeurs simulées de Tmoy par rapport à celles issues des observations interpolées sur une grille (ANUSPLIN) sera réalisée pour les trois mois d'été.

Cette validation inclura les simulations du modèle CRCM5 aux trois résolutions (0,11 °, 0,22 ° et 0,44 °), soit la climatologie mensuelle des Tmoy (période de 1981 à 2010) des mois juin à août sur la région d'étude présentée à la Figure 2.1 (panneau de droite). Les biais moyens seront calculés aux quatre points de grille autour de la station de Montréal McTavish, sachant que la superficie des quatre points de grille est fonction

de la résolution du modèle. Avant de calculer les biais moyens ou différence entre les valeurs simulées versus observées (cf. équation 2.9), une interpolation sera réalisée. Les données ANUSPLIN seront interpolées à la résolution de chacune des trois simulations du MRCC5 (0,11 °, 0,22 ° et 0,44 °). Une interpolation bilinéaire sera utilisée, elle permet d'ajuster une fonction linéaire pour chaque valeur de la grille d'origine (Mosier *et al.*, 2014). La méthode bilinéaire ne considère pas les conditions de surface et elle peut engendrer des différences de 3 degrés ou plus de différence par rapport à la température normale (Rong *et al.*, 2011). Cependant dans notre cas, on ne raffine pas la résolution mais au contraire on la dégrade (passage de 0,11 ° à 0,22 ° et de 0,11 ° à 0,44 °), de ce fait la méthode bilinéaire n'a pas beaucoup d'impact. On utilise un biais moyen (BM) défini comme la différence absolue entre la moyenne sur trente années des Tmoy mensuelles et calculé à partir d'une valeur de référence par rapport à des simulations de la façon suivante (Dibike *et al.*, 2008) :

$$BM = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^i (X_{Sim,i} - X_{Obs,i}) \quad (2.9)$$

Avec n le nombre de points de grille, $X_{Obs,i}$ la i^{eme} valeur mensuelle observée et $X_{Sim,i}$ la i^{eme} valeur mensuelle simulée.

Pour cette étude, on utilise les données de Tmoy d'ANUSPLIN comme base de référence ou valeur observée et les données de Tmoy du modèle CRCM5 aux trois résolutions (0,11 °, 0,22 ° et 0,44 °) comme valeurs simulées. Les BM sont calculés pour la période de 1981 à 2010 des mois de juin à août, en prenant la moyenne des valeurs de Tmoy prises pour chacun des quatre points de grille autour de la station de Montréal McTavish.

Ce critère d'évaluation permet de comparer les données ANUSPLIN à 0,11 ° par rapport à trois grilles de résolutions différentes, et d'évaluer les surestimations et sous estimations des températures. Ainsi, deux modèles dont les températures sont

identiques auront un biais égal à 0, un modèle qui surestime la température, par rapport aux valeurs de référence, aura un biais positif et un modèle qui sous-estime la température, par rapport aux valeurs de référence, aura un biais négatif.

2.4.4 Évaluation des changements régionaux vs locaux (actuels vs futurs)

2.4.4.1 Évaluation des changements de T_{moy}

On évalue les changements dans les T_{moy} mensuelles pour chaque mois d'été sur toute la région d'étude (cf. Figure 2.1). Pour cela, on calcule la variabilité interannuelle de l'anomalie mensuelle sur l'ensemble des MRCs pour les T_{moy} , en procédant ainsi :

- Pour chaque MRC (pour la période future de 2011 à 2100 pour les deux scénarios de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5) on calcule les indices de température mensuelle par année.
- Pour chaque MRC et simulation future, on calcule les anomalies interannuelles par rapport à la climatologie de référence (1971-2000) pour chacun des mois de juin à août. Pour cela, on utilise la formule suivante :

$$A = T_{moy} - Ref \quad (2.10)$$

Avec A l'anomalie interannuelle, T_{moy} , les T_{moy} d'un modèle pour une année (entre 2011 à 2100), des mois de juin à août, et Ref la climatologie mensuelle de référence calculée à partir des années de 1971 à 2000.

- Pour chaque MRC, on trace la variabilité interannuelle de l'anomalie mensuelle pour les quatre points de grille autour de Montréal, (six simulations de modèles considérées) pour chaque année de 2011 à 2100. On représente ensuite les moyennes d'ensemble des six simulations pour les deux scénarios du forçage

radiatif, en incluant les bornes supérieures et inférieures obtenues à partir des valeurs du modèle pour lequel les anomalies de températures sont les plus élevées (max), et le modèle pour lequel les anomalies de températures sont les plus faibles (min) et ce pour chaque année, respectivement.

2.4.4.2 Évaluation des changements dans les caractéristiques des canicules

Les 10^e, 50^e et 90^e centiles des indices de sévérité, d'intensité maximale et de durée des vagues de chaleur pour chaque mois de mai à septembre seront calculées pour la période historique de 1951 à 2005 et les deux périodes futures de trente ans (2041 à 2070 et 2071 à 2100) et ce pour chacun des scénarios RCP4.5 et RCP8.5, pour tous les MRCs en utilisant la moyenne des quatre points de grille autour de Montréal McTavish. Tous ces centiles sont représentés dans un diagramme à « bulles » (Figure 2.7) comme suit :

- Les 10^e centiles des durées, indice de sévérité et TMn des vagues de chaleur historiques (1951 à 2005 ; bulle grise de petite taille),
- Les médianes des durées, indice de sévérité et TMn des vagues de chaleur historiques (1951 à 2005 ; bulle grise de moyenne taille),
- Les 90^e centiles des durées, indice de sévérité et TMn des vagues de chaleur historiques (1951 à 2005 ; bulle grise de grande taille),
- Les 10^e centiles des durées, indice de sévérité et TM des vagues de chaleur futures (2041 à 2070 et 2071 à 2100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (bulle rose de petite taille),
- Les médianes des durées, indice de sévérité et TM des vagues de chaleur futures (2041 à 2070 et 2071 à 2100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (bulle rose de moyenne taille),

- Les 90^e centiles des durées, indice de sévérité et TM des vagues de chaleur futures (2041 à 2070 et 2071 à 2100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (bulle rose de grande taille).

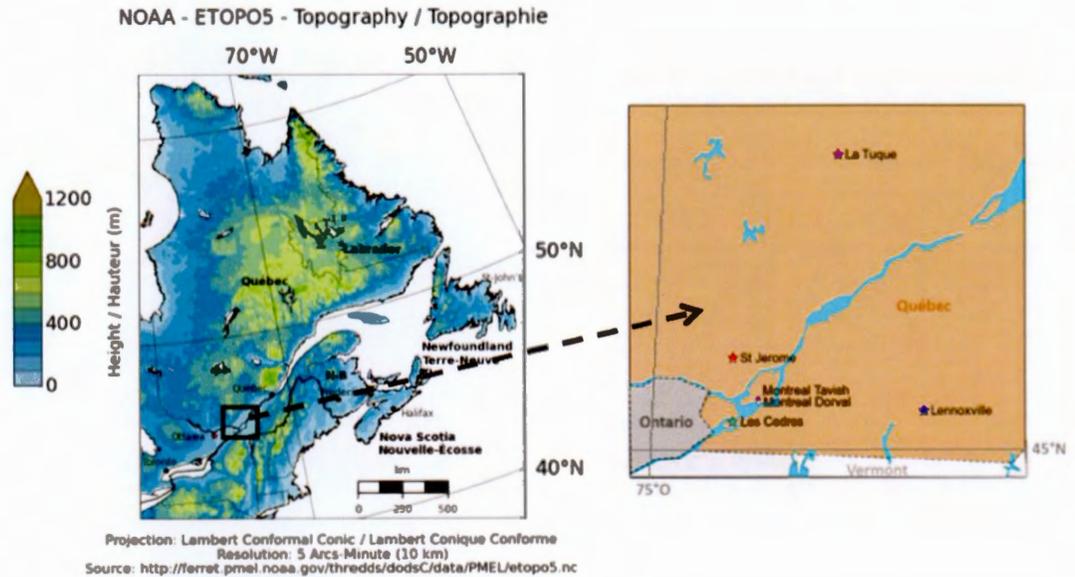


Figure 2.1 Topographie du Sud-Est du Canada (en m, panneau de gauche) et localisation de la région d'étude (panneau de droite) représentée par un rectangle noir dans le panneau de gauche. Dans le panneau de droite, l'emplacement des stations météorologiques (Montréal McTavish, Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme) est inclus (dont les coordonnées géographiques sont fournies au Tableau 2.1).

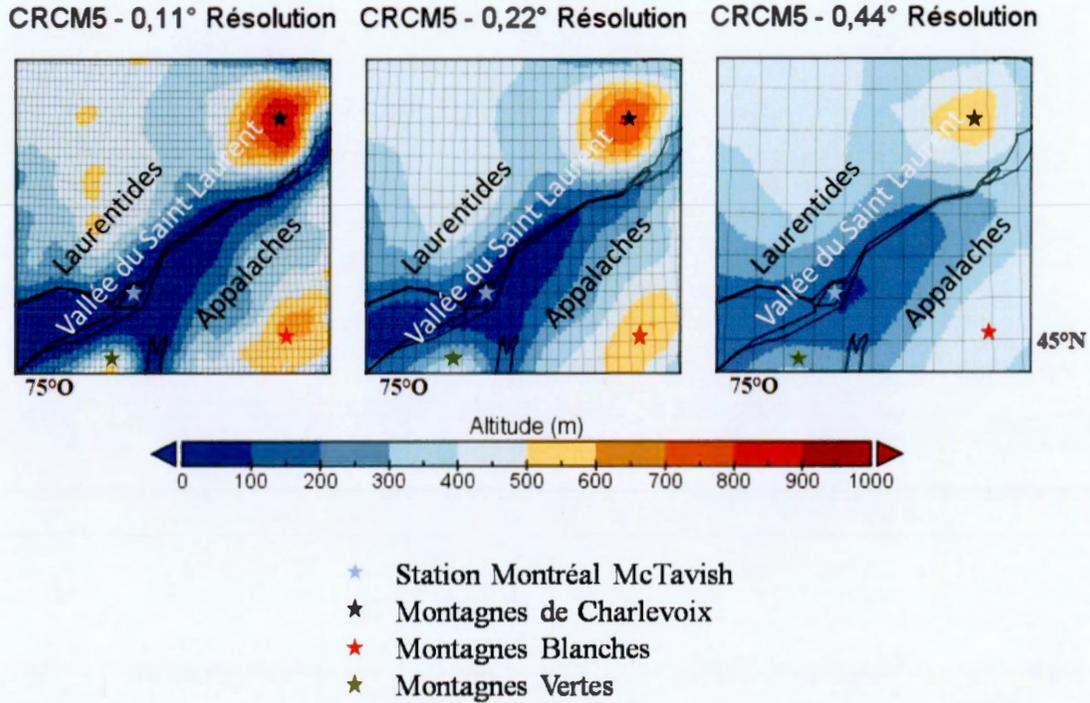


Figure 2.2 Topographie du Sud du Québec provenant du MRCC5 à différentes résolutions horizontales (0,11 ° panneau de gauche, 0,22 ° panneau du milieu, et 0,44 ° panneau de droite). L'altitude et la position des principaux reliefs (Laurentides et Appalaches), vallée du St-Laurent et vallée du Lac Champlain-Richelieu (située entre les Montagnes Vertes et Blanches) sont incluses dans chaque panneau.

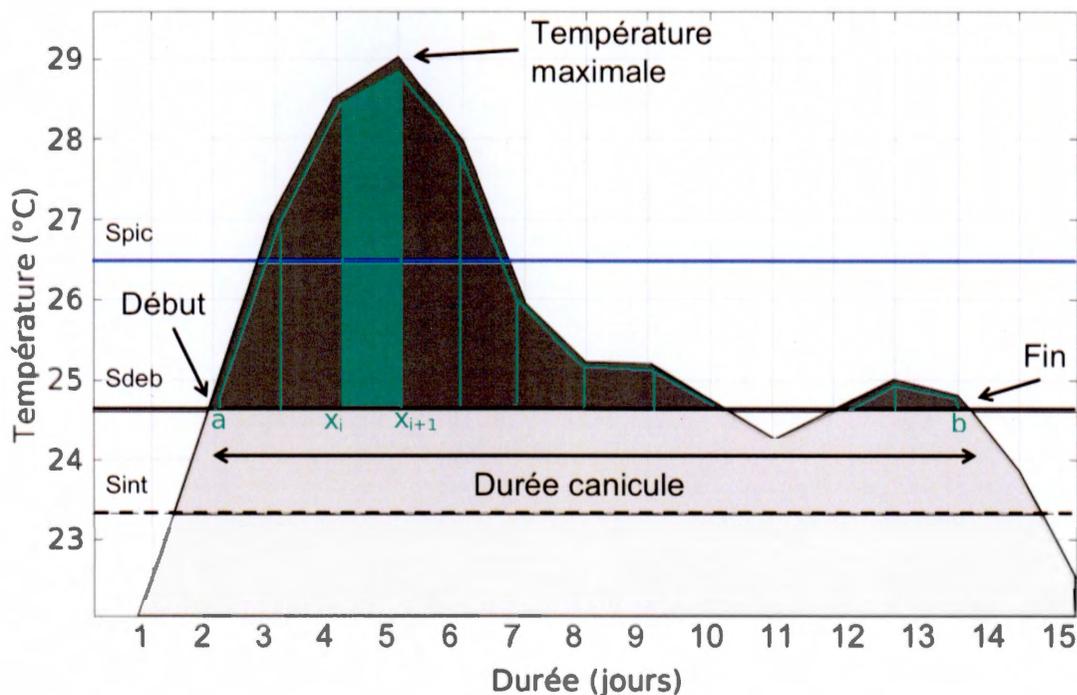


Figure 2.3 Principe d'identification d'une vague de chaleur ; exemple de la canicule de juillet 2010 pour la station de Montréal McTavish. Les différents seuils, Spic, Sdeb et Sint (99,5^e, 97,5^e et 95^e centiles des T_{moy} , respectivement) sont calculés à partir de la valeur des T_{moy} sur la période de référence (1981 à 2015) pour les mois de mai à septembre. La vague de chaleur est détectée dès lors que la T_{moy} dépasse le 99,5^e centile (Spic = courbe bleue). La durée doit être supérieure ou égale à 3 jours consécutifs. Le début de la canicule correspond au premier jour où la T_{moy} a dépassé le 97,5^e centile (Sdeb = courbe noire). La fin de la canicule est déterminée au jour où la T_{moy} redescend en dessous de Sdeb, de façon durable, dès lors que la $T_{moy} < 95^{\text{e}}$ centile (Sint = courbe noire pointillée). Trois paramètres servent à caractériser les canicules : la température maximale (T_M , °C), la durée de l'épisode caniculaire en jour (axe des abscisses) et l'indice de sévérité de la vague de chaleur, soit l'aire sous la courbe au-dessus de Sdeb (en gris foncé).

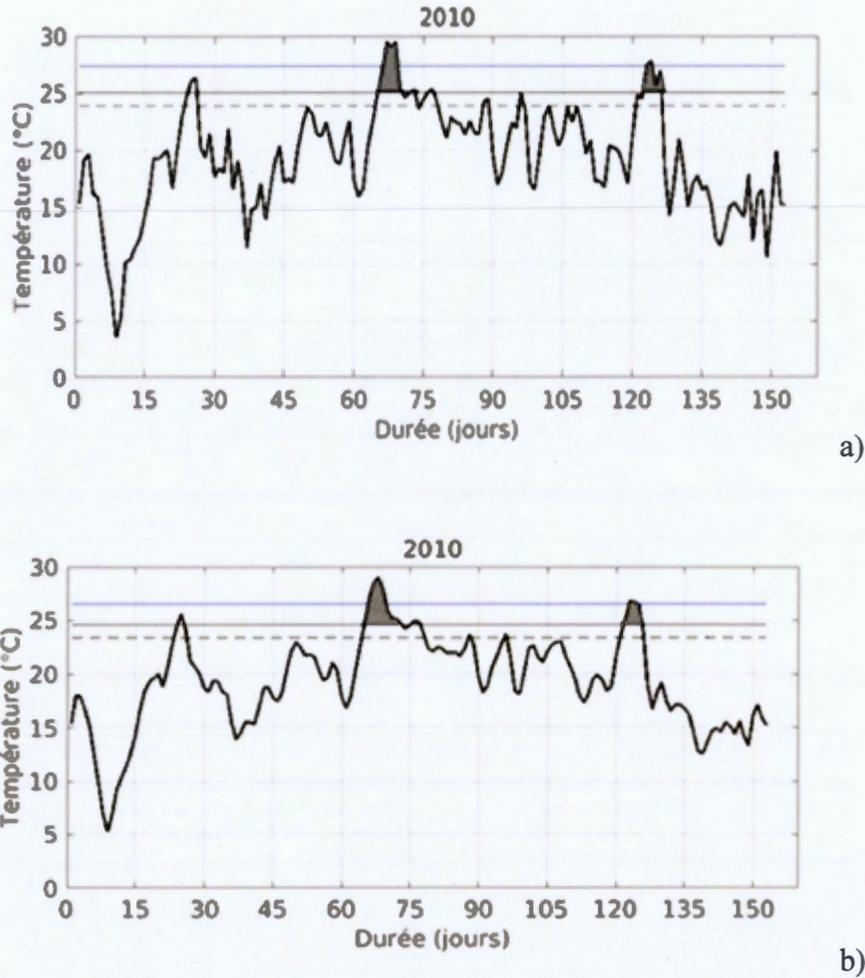


Figure 2.4 Détection des vagues de chaleur durant l'été 2010 pour les mois MJJAS (Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre) à la station Montréal McTavish, en utilisant a) les T_{moy} quotidiennes et b) la moyenne mobile sur 3 jours des T_{moy} quotidiens. Les seuils $Spic$, $Sdeb$ et $Sint$ sont respectivement représentés par la ligne bleue, noire et en pointillé. Les T_{moy} (en °C) sont représentées sur l'axe des ordonnées, la durée en jour est représentée sur l'axe des abscisses et la sévérité est l'aire représentée en grise foncée.

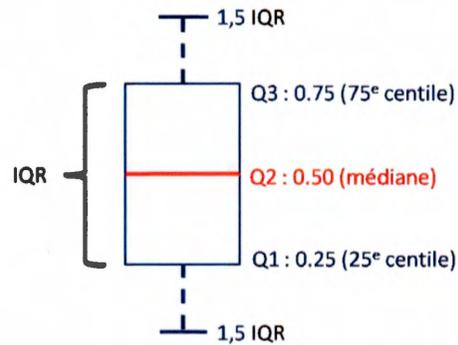


Figure 2.5 Exemple d'une boîte à moustache (box et whisker plots) avec Q1 le premier quartile (Q1, soit le 25^e centile), Q2 le deuxième quartile (médiane, soit le 50^e centile), Q3 le troisième quartile (Q3, soit le 75^e centile). L'intervalle interquartile (IQR = $Q3 - Q1$), et les valeurs inférieures et supérieures au 1,5 IQR sont les « outliers » qui seront représentées par des croix rouges dans les figures présentées au chapitre 3.

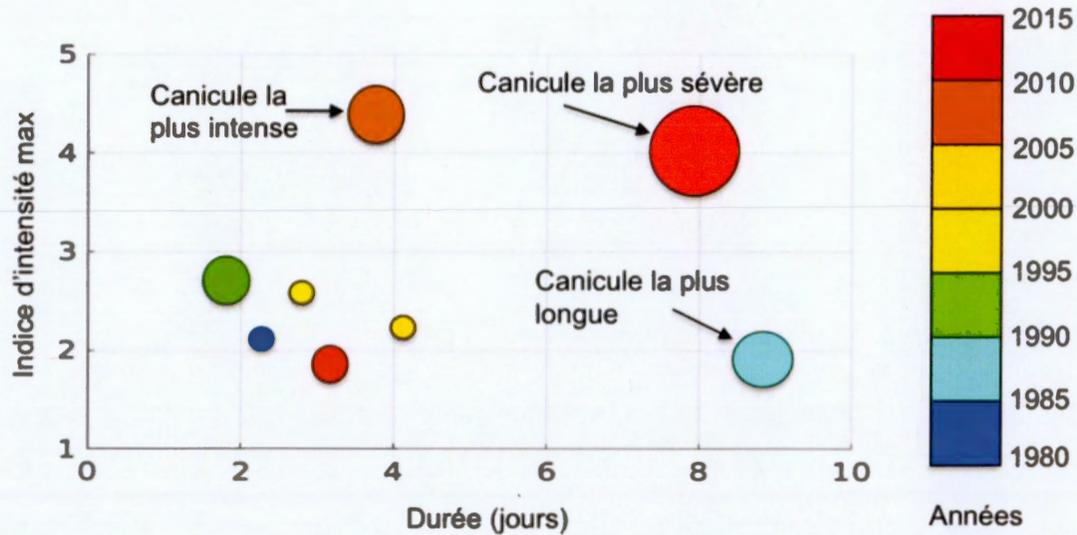


Figure 2.6 Exemple de graphique à bulle présentant les caractéristiques des vagues de chaleur pour une série de données couvrant la période de 1980 à 2015, selon les critères de durée et d'intensité maximale (TMn). La taille de chaque bulle est proportionnelle à l'indice de sévérité (selon l'évaluation de l'aire sous la courbe, cf. Figure 2.3). La bulle orange représente la vague de chaleur ayant l'intensité la plus élevée, la bulle rouge représente la vague de chaleur la plus sévère et la bulle bleue représente la canicule ayant durée le plus longtemps.

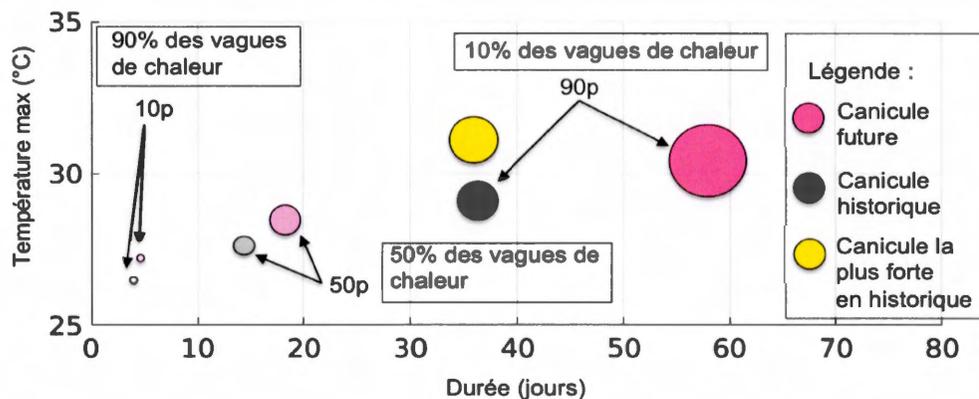
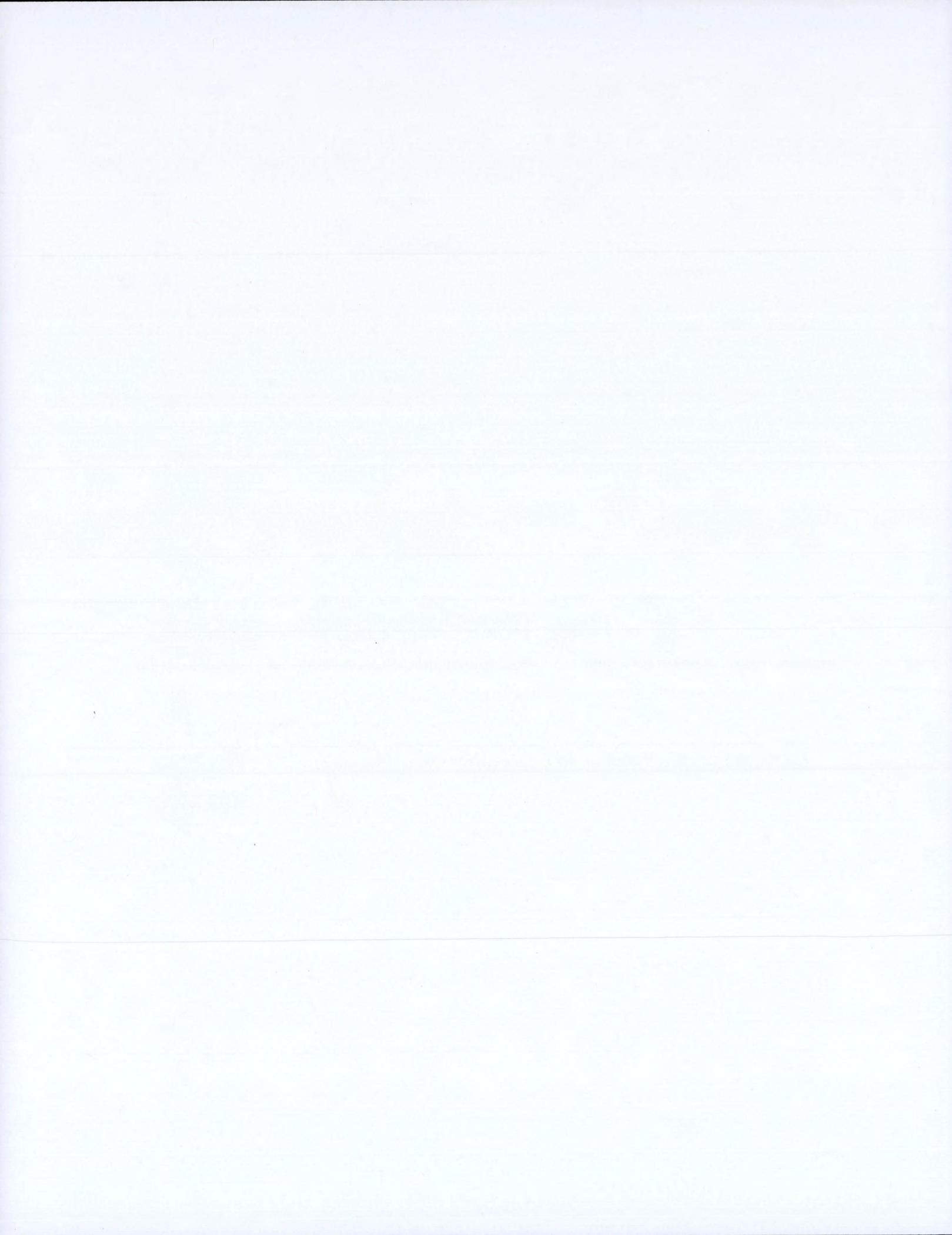


Figure 2.7 Exemple de graphique à bulle des 10^e, 50^e et 90^e centiles des durées (en jours), des TM (en °C) et des sévérités des canicules observées durant la période historique (1951-2005, bulle grise) et simulées dans les conditions futures (2041-2070 et 2071-2100; bulle rose). La bulle jaune représente la canicule la plus sévère observée durant la période de 1981 à 2015 à la station de référence.



CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1 Analyse de la variabilité historique des canicules

3.1.1 Évaluation à partir des données de stations

3.1.1.1 Distributions statistiques des T_{moy} et valeurs des seuils (Sint, Sdeb et Spic)

À partir de l'utilisation des valeurs observées de T_{moy} pour les 5 stations à l'étude, on peut constater que les valeurs médianes des T_{moy} varient de 16 à 19,5 °C en juin, de 19 à 23 °C en juillet et de 17 à 21 °C en août (cf. Figure 3.1). Les valeurs les plus élevées sont observées pour la station de Montréal McTavish et les plus faibles à La Tuque. L'écart de température entre ces deux stations varie de trois à quatre degrés selon le mois. Malgré cela, la forte dispersion de la distribution statistique des T_{moy} à La Tuque révèle que des valeurs de T_{moy} peuvent atteindre voire dépasser les 29 °C en juillet (soit deux degrés de différence avec la station de Montréal McTavish). En effet, les valeurs supérieures au 1,5 IQR ont des écarts moins prononcés entre les stations que ceux pour les valeurs médianes. Celles-ci varient entre 25 et 30 °C pour le mois de juin, entre 26 et 32 °C pour le mois de juillet et entre 25 et 32 °C pour le mois d'août. Les températures responsables du déclenchement d'une vague de chaleur (> Spic) peuvent donc être potentiellement atteintes, éventuellement de façon synchrone par l'ensemble des stations météorologiques. On retrouve les valeurs de températures

les plus élevées pas uniquement parmi les stations ayant les valeurs médianes les plus fortes, comme c'est le cas à St-Jérôme pour les mois de juin et juillet ou encore à la station Les Cèdres au mois de juillet.

Les valeurs Spic, qui sont calculées à partir des mois de mai à septembre, ont des valeurs qui se rapprochent de près des valeurs de référence fixées par les instituts sanitaires (cf. Tableau 3.3). Les stations de Montréal (McTavish et Dorval) obtiennent les valeurs Spic les plus proches de la valeur de référence associée à la RSS de Montréal. En revanche, l'écart le plus important entre le seuil Spic et la valeur de référence provient de la station de St- Jérôme. En effet, le seuil Spic, qui se base sur le 99,5^e centile de la distribution statistique des Tmoy sur les 30 années de 1981 à 2010, révèle une valeur inférieure à celles atteintes à Montréal (Dorval ou McTavish) alors que la RSS (classe 3) inclut dans le même groupe St Jérôme et les stations de Montréal (cf. Chebana *et al.*, 2013).

Tableau 3.1 Comparaison des valeurs de Sdeb, Spic et Sint (correspondant au 95^e, 97,5^e et 99,5^e centiles du Tmoy, respectivement) pour les différentes stations (présentées au Tableau 2.1) par rapport aux seuils de Tmoy (Tmax et Tmin) utilisés selon les différentes régions socio sanitaires dans l'étude de Chebana *et al.* (2013). Ces comparaisons sont réalisées à partir des données quotidiennes de Tmoy couvrant la période de référence de 1981 à 2010.

	Montréal McTavish	Montréal Dorval	Les Cèdres	La Tuque	St Jérôme	Lennoxville
Spic (°C)	26,4	26	25,4	23,8	24,7	24,2
Sdeb (°C)	24,6	24	23,6	21,7	22,8	22,2
Sint (°C)	23,3	22,7	22,5	20,3	21,5	21
Valeurs de référence pour les différentes régions socio sanitaires						
Tmax (°C)	33	33	33	31	33	31
Tmin (°C)	20	20	20	18	20	18
Tmoy (°C)	26,5	26,5	26,5	24,5	26,5	24,5

3.1.1.2 Analyse des tendances sur les Tmoy mensuelles (période de 1981 à 2010)

Le Tableau 3.2 présente les tendances significatives (au seuil de 90 %) par année pour les différentes stations utilisées. Hormis pour les stations de La Tuque et de Lennoxville, quelques tendances significatives s'observent principalement en juin et en août. De 1981 à 2010, les Tmoy augmentent de 1,2 °C en juin pour la station Les Cèdres et jusqu'à 2 °C en août pour la station de Dorval. Pour les Tmax, les températures augmentent de 0,9 °C en août pour la station de Montréal McTavish jusqu'à 1,3 °C en août pour la station de St-Jérôme. Enfin, pour les Tmin, les

températures augmentent de 1,4 °C en juin pour la station de Les Cèdres jusqu'à 2,6 °C en août pour la station de Dorval. Ces tendances qui sont calculées sur une période de temps assez courte (30 ans) peuvent donc ne pas être systématiques sur le territoire à l'étude (mois et stations), et ne reflètent pas nécessairement l'ampleur ou les tendances à long terme si on les considère sur un siècle ou plusieurs décennies (cf. études de Khaliq *et al.*, 2007; Vincent *et al.*, 2012).

Tableau 3.2 Tendances significatives au seuil de 90 % (P-value < 0,1) pour chacun des mois de juin à août, calculées sur la période de 1981 à 2010 (en °C/an), pour les variables de températures (Tmoy, Tmax et Tmin) quotidiennes. Pour la plupart des mois, les tendances sont non statistiquement significatives (NS : Non Significative au seuil de 90 %).

	Mois	Tmoy	Tmax	Tmin		Mois	Tmoy	Tmax	Tmin
Montréal McTavish	Juin	NS	NS	NS	La Tuque	Juin	NS	NS	NS
	Juillet	NS	NS	NS		Juillet	NS	NS	NS
	Août	NS	0,030	NS		Aout	NS	NS	NS
Montréal Dorval	Juin	NS	NS	NS	Lennoxville	Juin	NS	NS	NS
	Juillet	NS	NS	NS		Juillet	NS	NS	NS
	Août	0,073	NS	0,087		Août	NS	NS	NS
Les Cèdres	Juin	0,037	0,038	0,046	St-Jérôme	Juin	0,038	NS	0,047
	Juillet	NS	NS	NS		Juillet	NS	NS	NS
	Août	NS	NS	NS		Août	0,044	0,045	0,049

3.1.1.3 Analyse des canicules de 1870 à 2015 et de 1981 à 2010

a) Station Montréal McTavish (1870-2015)

La Figure 3.2 présente les différentes vagues de chaleur détectées au cours de la période de 1870 à 2015 à la station de Montréal McTavish. Au cours de cette période, une centaine de canicules sont détectées, principalement durant les mois juillet et août. Un tiers des vagues de chaleur détectées présentent des paramètres d'intensité, de durée et

de sévérité avec de faibles écarts entre eux, respectivement, de 0,5 °C, 3 jours et d'une sévérité de 2. Ces vagues de chaleur sont principalement détectées durant les années 1940 à 2015. Pour les deux tiers restants, les vagues de chaleur détectées ont des paramètres d'intensité, de durée, et de sévérité avec des écarts plus prononcés entre eux, respectivement de 1,4 °C, 13 jours et d'une sévérité de 11. Les canicules les plus sévères s'observent au cours des années 1921, 1988 et 2010 avec des valeurs de sévérité qui varient entre 7 et 13, les plus intenses ayant été observées au cours des années 1987 et 2010 avec des valeurs d'intensité de 2,3/2,4 (TM : 28,7 °C/28,8 °C). Enfin, les plus longues se sont produites en 1872, 1921, 1988 et 2010 avec des valeurs qui varient entre 16 et 19 jours.

Le nombre de vagues de chaleur par décennie varie de 2 à 13 événements (valeur maximale en 2000-2009) et augmente à partir des années 1930 (cf. Figure 3.3 a). Les figures b), c) et d) de la Figure 3.3 mettent en évidence une forte variabilité dans les distributions statistiques des paramètres des vagues de chaleur. Majoritairement, on retrouve une faible variabilité durant les décennies où l'on observe un nombre de vagues de chaleur peu élevé (exemple : 1880-1889 et 1890-1899) et une plus forte variabilité durant les décennies où l'on observe un nombre élevé de vagues de chaleur (exemple : 2000-2009). De même, les vagues de chaleur les plus sévères se retrouvent le plus souvent dans les décennies ayant des occurrences plus fortes d'événements (par exemple : 1970-1979, 1980-1989 et 2000-2009).

b) Comparaison des canicules détectées pour les autres stations météorologiques par rapport à celles détectées à la station de Montréal McTavish (1981-2010)

Des vagues de chaleur ont été détectées sur tout le territoire à l'étude, soit de façon concomitante à Montréal McTavish, Montréal Dorval, La Tuque, Les Cèdres, Lennoxville et St-Jérôme, durant les années 1991, 2002, 2005 et 2010. Cette dernière année a connu une vague de chaleur qui a entraîné des conséquences sanitaires dans le sud du Québec (cf. figure 3.4). En moyenne par année, cinq stations sur six présentent

la même canicule. Ainsi, même si les températures sont plus élevées en moyenne à Montréal McTavish que dans les autres stations, les conditions de détection d'une vague de chaleur sont également rencontrées pour les autres stations météorologiques. Cependant, il arrive que seule la station Montréal McTavish présente des événements caniculaires au cours des années 1981, 1983 et 1990. Cette différence de température implique que les seuils de température servant au déclenchement d'une vague de chaleur sont atteints en centre-ville mais ne sont pas forcément atteints en zone périphérique (Gachon *et al.*, 2016), sans doute reliée à la formation des ICU.

En termes de nombre de vagues de chaleur (cf. Figure 3.5), le plus grand nombre de vagues de chaleur a été détecté au cours de la décennie 2000-2010, en excluant La Tuque. Cette dernière station révèle en effet une tendance à la baisse du nombre de vagues de chaleur.

La figure 3.6 présente les 10^e, 50^e et 90^e centiles des paramètres d'intensité, de sévérité et de durée des vagues de chaleur pour les différentes stations. Les paramètres des canicules les plus élevés s'observent aux stations de Montréal (McTavish et Dorval). De façon générale, les valeurs de sévérités, peu importe le centile, sont assez similaires d'une station à l'autre. Les plus grandes différences s'observent pour les durées et les TM. Les 10^e/50^e/90^e centiles révèlent des écarts de 1,8 jours et de 3 °C/2,8 jours et 3 °C/5 jours et 2 °C entre les stations météorologiques. Les TM diffèrent principalement à cause de la position de la station selon leur position en latitude et en altitude (plus élevées au sud et dans les vallées). Cependant, bien que La Tuque obtienne des TM plus faibles qu'à Montréal, les valeurs de sévérité sont assez similaires aux autres stations.

3.1.2 Évaluation des simulations de modèles climatiques régionaux

3.1.2.1 Valeurs ajoutées des simulations à haute résolution du MRCC5 pilotées en mode réanalyse

Les simulations des MRCs pilotés en mode réanalyse permettent de générer des informations qui sont en phase avec les conditions météorologiques observées et qui sont compatibles avec les séquences temporelles des événements observés sur le territoire, y compris les aléas tels que les canicules. Ces simulations peuvent donc être validées ou comparées aux séquences et aux statistiques des variables météorologiques observés et servir de référence sur la période historique (cf. Eum *et al.*, 2012), c'est-à-dire que les champs simulés par le MRC sont corrélés avec les observations dans une certaine mesure (De Elia *et al.*, 2016).

a) Sur l'ensemble de la région d'étude : Evaluation des biais des Tmoy simulés vs ANUSPLIN

La Figure 3.7 représente les biais moyens entre le modèle MRCC5 utilisant trois résolutions horizontales différentes (10 km, 20 km et 50 km) et la valeur de référence ANUSPLIN. En général, les températures simulées sont légèrement sous estimées par le modèle par rapport à ANUSPLIN au mois de juin, peu importe la résolution utilisée, tandis qu'elles sont surestimées pour les mois de juillet et août (en moyenne de 1/2 °C). Les surestimations les plus élevées s'observent pour le mois de juillet (biais positif jusqu'à 3 °C). Les biais sont légèrement plus faibles au mois de juin dans la simulation avec la résolution la plus élevée (0,11°) surtout dans le Nord de la région où les modèles à plus basses résolutions produisent des biais plus élevés. Pour les mois de juillet et d'août, les différences entre les trois résolutions s'observent principalement dans les zones de relief plus élevées (Charlevoix et Appalaches), alors les biais sont moins importants avec le modèle à 0,44° de résolution dans le centre et le sud de la

région d'étude. En conclusion, la valeur ajoutée reliée à une résolution plus fine n'est pas systématique et dépend du mois et du secteur concerné, en particulier selon la présence ou non de relief marqué (biais en général moins élevé avec le modèle utilisant une résolution plus fine).

b) Comparaison des canicules historiques simulées vs observées localement (stations et ANUSPLIN)

La Figure 3.8 présente les vagues de chaleur détectées par les données de grille, que ce soit les valeurs observées ou simulées (ANUSPLIN, MRCC5 piloté ERA-INTERIM aux trois résolutions). Les données ANUSPLIN confirment les caractéristiques des quatre canicules précédemment analysées à la figure 3.2, qui se démarquent par leur sévérité élevée (1987, 1998, 2001 et 2010). Ces dernières varient entre 5,5 et 10, dont deux d'entre elles (2001 et 2010) avec des durées les plus longues entre 15 et 16 jours et également les plus intenses (1987 et 2010), avec la vague de chaleur de 2002, variant de 2 à 2,4. Les simulations avec le modèle MRCC5 reproduisent le plus souvent certaines des caractéristiques des événements observés (ex. 2001, 1984, et 1995), même si les durées ou les intensités peuvent être surestimées (ex. 24 jours au cours des années 1999, 1984, et 2001) par rapport aux données ANUSPLIN.

Pour les 10^e, 50^e et 90^e centiles des paramètres d'intensité, de sévérité et de durée des vagues de chaleur pour les différentes données de grille (cf. Figure 3.9), les valeurs les plus élevées proviennent du modèle MRCC5 à 20 km de résolution (surestimation par rapport aux données ANUSPLIN). De façon générale, les paramètres des canicules sont surestimés dans les simulations du modèle MRCC5 par rapport à ceux obtenus par les données ANUSPLIN. Les valeurs des sévérités restent cependant assez similaires tandis que l'on observe des différences plus notables dans l'intensité et la durée des vagues de chaleur, avec des écarts variant de 1 jour à 3 jours et de 2 °C à 2,5 °C pour les températures maximales entre les données simulées et ANUSPLIN.

La figure 3.10 présente l'histogramme où l'on a détecté une vague de chaleur à la station de Montréal McTavish et son équivalent à partir des données de grille (ANUSPLIN et trois simulations du MRCC5). Dix des treize vagues de chaleur observées à la station Montréal McTavish ont été détectées par les données ANUSPLIN et le modèle MRCC5 à 10 km de résolution. Toutefois, seulement 4/6 canicules des 13 canicules observées ont été détectées par le modèle MRCC5 à 20/50 km de résolution. Certaines années, 1987, 2002 et 2010, toutes les sources de données permettent de détecter les canicules, notamment la plus sévère d'entre toutes (i.e. 2010).

En conclusion, les vagues de chaleur détectées par les données ANUSPLIN révèlent des caractéristiques très proches de celles obtenues avec les vagues de chaleur détectées à la station Montréal McTavish, notamment en ce qui concerne la vague de chaleur de 2010. Le MRCC5 à 10 km de résolution détecte plus souvent les canicules observées que le modèle utilisant des résolutions plus grossières, qui sous-estiment le plus souvent leur occurrence.

3.1.2.2 Comparaison des Tmoy de tous les MRCs

La Figure 3.11 présente les boxplots de la distribution des Tmoy des mois de juin, juillet et août, réalisés à partir des données ANUSPLIN, du modèle MRCC5 piloté ERA-INTERIM utilisant les trois résolutions (0,11 °, 0,22 ° et 0,44 °) et des modèles régionaux pilotés MGCs sur une période commune allant de 1980 à 2005 pour les valeurs entourant la station de Montréal McTavish. Les données ANUSPLIN sont les données de référence par rapport aux modèles. Comme suggéré précédemment, les simulations avec le MRCC5 pilotées en mode réanalyse reproduisent relativement bien les valeurs médianes observées (surtout en juin avec la version à 10 km), alors que les simulations pilotées avec le MPI-M-MPI-LR, et les autres MRCs (DMI-HIRHAM et SMHI-RCA4) sous-estiment ces valeurs. Cependant, les valeurs extrêmes ($> 1,5$ IQR) sont relativement similaires avec les données ANUSPLIN. Dans la simulation avec le

modèle CanRCM4, les valeurs extrêmes sont le plus souvent surestimées, parfois de plus de 3°C.

En résumé, les Tmoy issues des MRCs pilotés ERA-INTERIM sont comparables à celles d'ANUSPLIN, malgré quelques biais d'environ 1 °C par rapport aux données ANUSPLIN. Les données de simulations historiques en mode MGC présentent par contre des biais variant de 2 à 3 °C, selon les modèles régionaux et le mois considérés.

3.2 Analyse des changements futurs des canicules

3.2.1 Changement des Tmoy pour l'ensemble du domaine d'étude

La Figure 3.12 présente les anomalies interannuelles de la Tmoy des mois de juin, juillet et août pour la période de 2011 à 2100 avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par rapport à la période de référence de 1971 à 2005. Les Tmoy sont calculées à partir des quatre points de grille autour de Montréal McTavish.

Pour le scénario RCP4.5, les modèles projettent en moyenne une augmentation de 2 °C/3 °C, selon le mois, entre le début et la fin du 21^e siècle. L'écart entre les maxima de réchauffement simulé entre les deux scénarios est plus élevé au mois d'août avec des valeurs pouvant atteindre les 10 °C. En effet, pour le scénario RCP8.5, les modèles projettent en moyenne une augmentation de 6 à 8 °C entre le début et la fin du siècle, alors que celle-ci est limitée à environ 2 à 3°C pour le scénario RCP4.5. De plus, la variabilité intra-modèle augmente avec le temps, avec des différences pouvant atteindre 7 °C/11 °C selon le scénario RCP4.5/RCP8.5.

En résumé, les modèles projettent une augmentation de la température qui augmente avec le temps, d'autant plus notable pour le scénario RCP8.5. La variabilité intra-

modèle augmente au cours du temps, atteignant son maximum à la fin du XXI^e siècle. Cette différence est d'autant plus élevée pour le scénario RCP8.5 et pour le mois d'août.

L'ANNEXE C présente les climatologies des moyennes d'ensemble de la T_{moy} des modèles pour les mois de juin à août, pour les périodes de 2041 à 2070 et de 2071 à 2100.

3.2.2 Changements locaux des canicules

3.2.2.1 Caractéristiques générales des canicules futures : Horizons 2041-2070 et 2071-2100 selon les deux scénarios RCPs vs les conditions historiques

a) Analyse des vagues de chaleur pour la période de 2041 à 2070

A partir de la Figure 3.13 a), on analyse les centiles des paramètres futurs des vagues de chaleur pour la période de 2041-2070. Voici les principaux constats :

- Pour les 10^e centiles des vagues de chaleur, les paramètres (TM, durée et sévérité) ne varient peu ou pas, peu importe les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les valeurs sont le plus souvent équivalentes à période historique et varient entre 23 °C et 28 °C pour les TM, 4 à 6 jours pour la durée et de 0.3 à 1,4 pour la sévérité.
- Pour les 50^e centiles des vagues de chaleur, les TM restent similaires pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et la période historique, variant entre 24 °C et 29 °C. En revanche, les durées sont systématiquement plus longues, en moyenne, d'environ 3 jours ce qui provoquent une augmentation de la sévérité qui double dans le futur pour les deux scénarios par rapport à la période historique, atteignant des valeurs de 8. Malgré une durée plus longue, la vague de chaleur de 2010 révèle des caractéristiques typiques des 50^e centiles des paramètres des vagues de chaleur dans le climat futur. C'est-à-dire que 50 %

des vagues de chaleur (horizon 2041-2070) auront une sévérité et une intensité similaires à celles obtenues durant la vague de chaleur de 2010.

- Pour les 90^e centiles des vagues de chaleur, les TM présentent des températures plus élevées de 2 à 3 °C, en moyenne, pour les canicules futures par rapport aux canicules historiques, avec une valeur maximale de 34 °C. Dans ce cas, les durées et les sévérités augmentent davantage dans le futur. Elles sont, en moyenne, deux fois plus longues pour les deux scénarios, trois fois plus sévères pour le scénario RCP4.5 et jusqu'à six fois plus sévères pour le scénario RCP8.5, par rapport à la période historique. Dans ce dernier cas, les valeurs des paramètres des vagues de chaleur pourraient atteindre les 47 jours et une sévérité d'environ 80.

En résumé, les 10^e centiles des vagues de chaleur pour la période de 2041 à 2070 présenteront des paramètres quasi identiques aux vagues de chaleur historiques. Toutefois, 50 % des vagues de chaleur seraient de la même sévérité et intensité que la canicule de 2010. Les 90^e centiles indiquent que les vagues de chaleur auront, en moyenne, des durées deux fois plus longues et de trois à six fois plus sévères que durant la période historique, et dépasseront largement la sévérité de la canicule observée en 2010 dans le sud du Québec.

b) Analyse des vagues de chaleur pour la période de 2071 à 2100

A partir de la Figure 3.13 b), on analyse les centiles des paramètres futurs des vagues de chaleur pour la période de 2071-2100. Voici les principaux constats :

- Pour les 10^e centiles, une fois encore, les vagues de chaleur sur les périodes historique et future présentent des paramètres similaires.
- Pour les 50^e centiles des vagues de chaleur, les TM sont légèrement plus élevées de 1 à 2 °C vers la fin du 21^e siècle à partir des deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) par rapport à la période historique. En revanche, les durées et les

sévérités augmentent largement pour les vagues de chaleur futures. En moyenne, les durées sont plus longues de 3 jours et les sévérités ont triplé dans le futur pour les deux scénarios par rapport à la période historique. Des vagues de chaleur pouvant durer 13 jours et atteindre une sévérité de 10 sont anticipées. La vague de chaleur de 2010 obtient, une fois encore, les mêmes caractéristiques que les vagues de chaleur futures.

- Pour les 90^e centiles des vagues de chaleur, les TM seront nettement plus élevées dans le futur, notamment pour le scénario RCP8.5, soit de 4 à 6 °C par rapport aux valeurs des TM historiques. Les durées deviendront beaucoup plus longues et les sévérités plus élevées, notamment pour le scénario RCP8.5. Les vagues de chaleur seront, en moyenne, deux fois plus longues pour le scénario RCP4.5 et cinq fois plus longues pour le scénario RCP8.5 par rapport à la période historique. Elles pourraient être, en moyenne, trois fois plus sévères pour le scénario RCP4.5 et quatorze fois plus sévères pour le scénario RCP8.5 selon certains modèles. Le modèle MRCC5 piloté CanESM2 projette que 10% des vagues de chaleur auront des durées égales ou supérieures à 85 jours et des sévérités égales ou supérieures à environ 160. 10% des vagues de chaleur, détectées par ce modèle, seraient environ cinq fois plus longues et vingt fois plus sévères que la vague de chaleur de 2010.

En résumé, les 10^e centiles des vagues de chaleur pour la période de 2071 à 2100 conserveraient des paramètres identiques aux vagues de chaleur historiques. En revanche, 50 % des vagues de chaleur futures auraient, en moyenne, des sévérités et des intensités équivalentes à la canicule de 2010. Les canicules les plus sévères, soit les 90^e centiles des vagues de chaleur, seraient, en moyenne, deux à cinq fois plus longues et trois à quatorze fois plus sévères pour la période de 2071 à 2100 que durant la période historique.

c) Évaluation des vagues de chaleur futures avec ajout de l'indice Humidex

L'ajout du critère d'humidité relative (l'indice Humidex) permet dans cette section d'inclure l'effet (additif) de l'humidité de l'air (chaleur humide) sur la sévérité des canicules. Les Figures 3.14a) et 3.14b) présentent les vagues de chaleur pour la période de 2041 à 2070 et de 2071-2100 respectivement, uniquement pour le scénario RCP8.5. L'humidité relative étant un facteur aggravant pour les canicules, les indices de sévérité sont donc beaucoup plus élevés en ajoutant l'indice Humidex. Comme précédemment, les sévérités obtenues via les 10^e centiles ont des valeurs similaires dans le futur que rapport à la période historique. Les 50^e centiles présentent des sévérités qui doublent en périodes futures. Les 90^e centiles obtiennent des sévérités qui augmentent, avec des valeurs 4/10 fois plus élevées pour les scénarios RCP4.5/RCP8.5 par rapport aux valeurs obtenues en période historique. Dans le cas du scénario RCP8.5 à l'horizon 2071 à 2100, certain modèle (ex. SMHI-RCA4 piloté CanESM2) prévoit même des vagues de chaleur qui atteindrait une sévérité d'environ 280 soit treize fois plus élevée que durant la période historique.

3.2.2.2 Changements spécifiques des critères de canicules (durée, TM, TMn et sévérité) par décennies vs durant la période historique

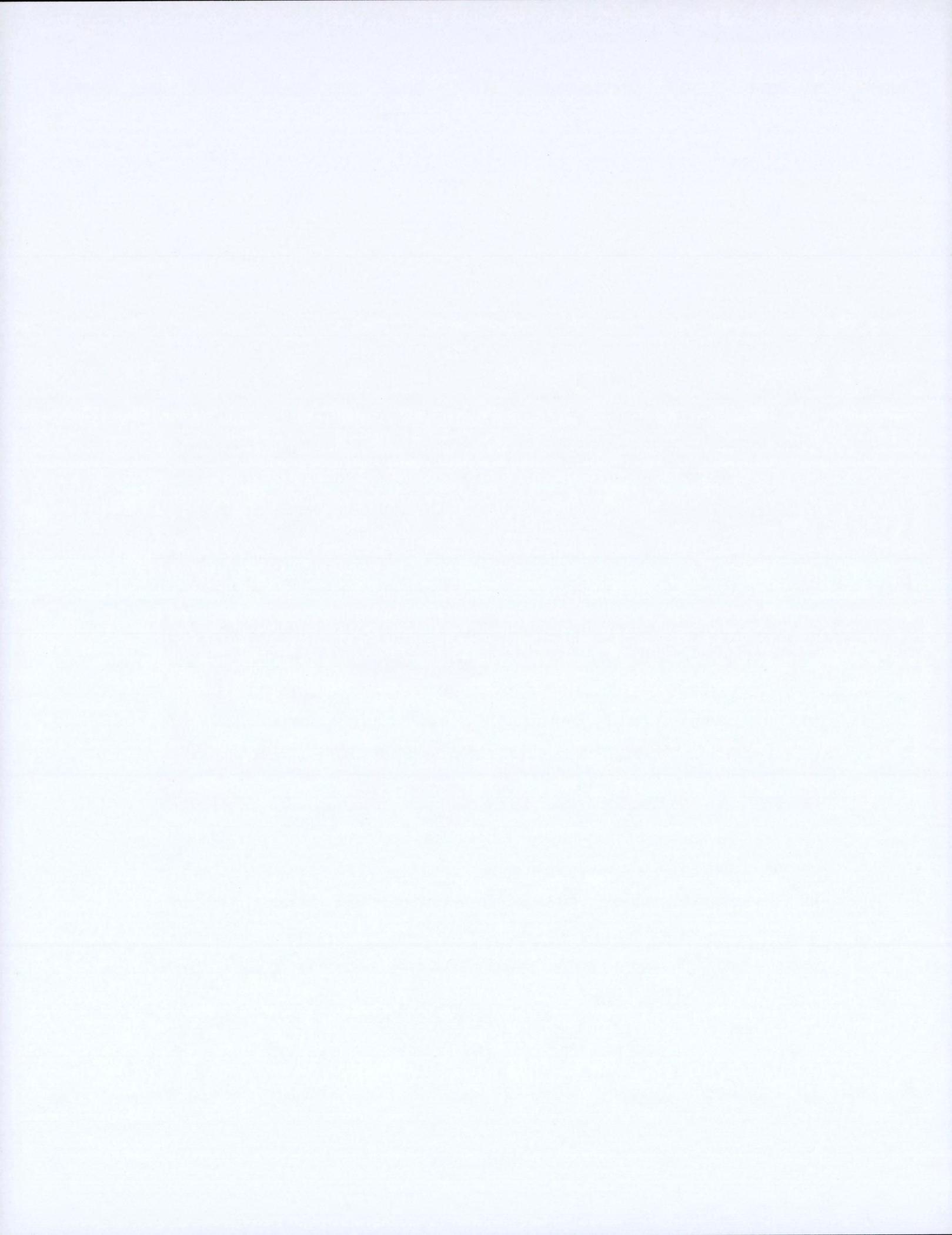
L'évolution de la TM moyenne pour la période de 1950 à 2100 (cf. Figure 3.15) est caractérisée par une faible variation des températures entre les modèles durant la période historique (moins de 3°C en général), mais cette différence augmente avec le temps (jusqu'à 5 °C) au fur et à mesure que le réchauffement s'accroît. La température se maintient autour de 27 °C en période historique, et augmente d'environ 1,5 °C/3,5 °C pour les scénarios RCP4.5/RCP8.5 à la fin du siècle par rapport au début du siècle. Comme suggéré précédemment pour les Tmoy mensuelles (cf. Figure 3.12), l'augmentation de 3,5 °C/5,5 °C des Tmoy maximum pour les mois de mai à septembre

de 1950 à 2100 selon les scénarios RCP4.5/RCP8.5 sont évidemment de nature à accroître la sévérité des canicules dans le futur.

L'évolution de la durée moyenne pour la période de 1950 à 2100 (cf. Figure 3.16) est dans ce cas très significative. Alors que durant la période historique, les durées oscillent entre 5 à 12 jours de canicules, dans le futur, elles seront en nette augmentation. Pour le scénario RCP4.5, ces durées pourraient être deux à trois fois plus longues durant la dernière décennie du 21^e siècle par rapport à la décennie 2000-2009. Pour le scénario RCP8.5, celles-ci pourraient être de trois à cinq fois plus longues.

L'évolution de la sévérité moyenne pour la période de 1950 à 2100 (cf. Figure 3.17) est également caractérisée par une nette augmentation. Entre 2 et 5 durant la période historique, la sévérité pourrait soit tripler (scénario RCP4.5) soit devenir dix à quinze fois plus importante (RCP8.5) à la fin du XXI^e siècle par rapport au début du siècle. Dans le cas de l'intensité (cf. Figure 3.18), c'est surtout avec le scénario RCP8.5 que le changement est le plus significatif, avec des vagues de chaleur deux fois plus intenses pour la décennie 2090-2100 par rapport à la décennie 2000-2009.

En terme de nombres de vagues de chaleur moyen, en comparant la période de 1950 à 2100 avec les simulations de MRCs disponibles et les données observées à la station Montréal McTavish depuis 1870 (cf. Figure 3.19), les changements sont également très substantiels. De 4 à 14 canicules par décennie de 1860 à 1949, on voit une augmentation d'environ 5 canicules vers la fin du 20^e siècle. En période future, pour la plupart des simulations de MRCs et selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 considérés, on anticipe un doublement du nombre de vagues de chaleur pour la décennie 2090-2100 par rapport à la décennie 2000-2009..



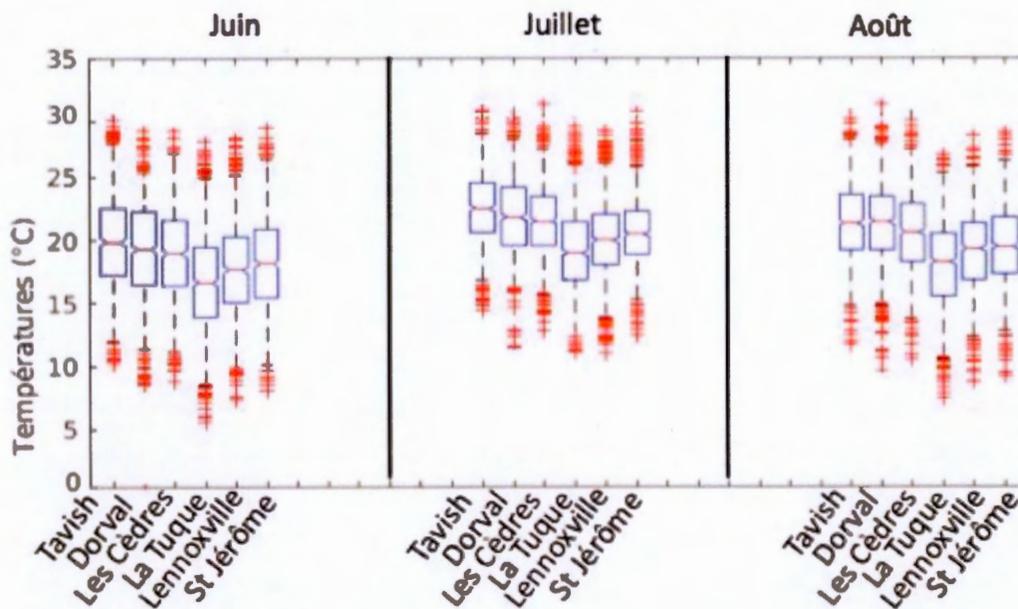


Figure 3.1 Boîtes à moustache de la distribution statistique des Tmoy mensuelles pour les mois de juin à août, calculés sur une période de 30 ans (1981 à 2010) pour les stations de Montréal McTavish, Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme. Le nom de chaque station est indiqué sur l'axe des abscisses et les températures moyennes quotidiennes (en °C) sont représentées sur l'axe des ordonnées. La localisation de ces stations est présentée à la Figure 2.1.

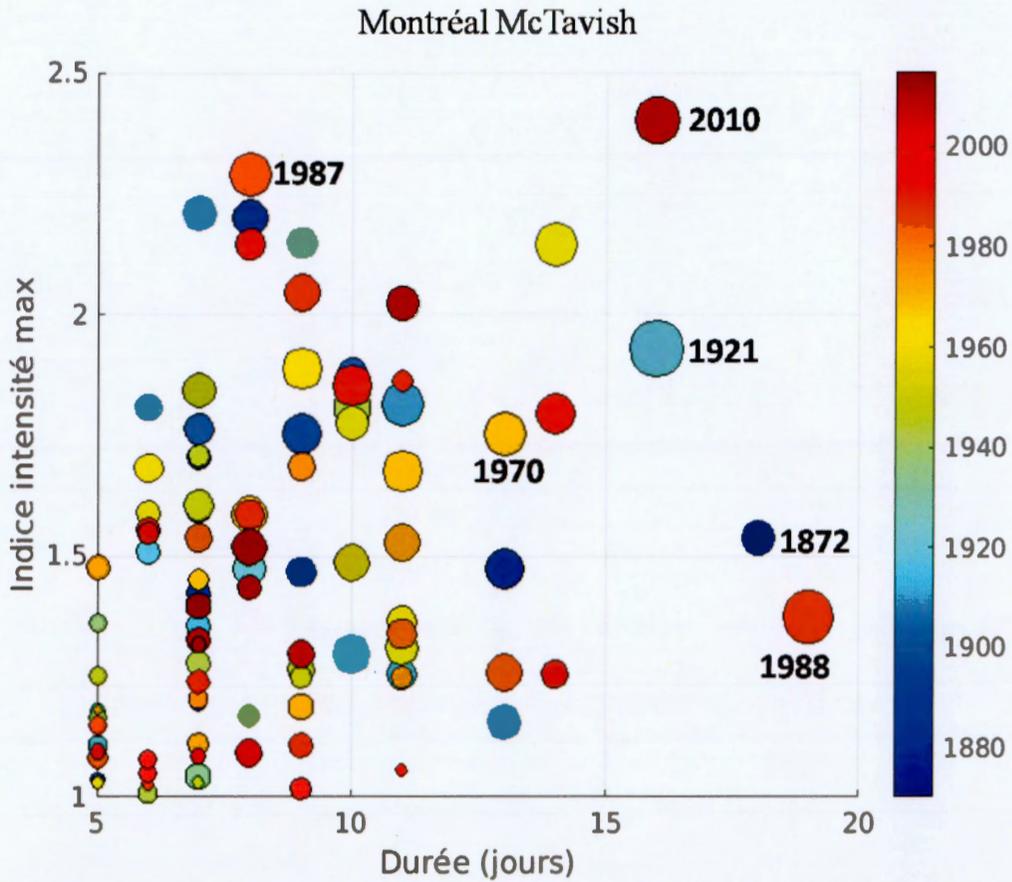


Figure 3.2 Vagues de chaleur détectées pour la station Montréal McTavish sur la période de 1870 à 2015. L'axe des ordonnées représente l'indice d'intensité maximale, l'axe des abscisses représente la durée en jour, la taille des bulles représente la sévérité d'une vague de chaleur et la couleur des bulles correspond à l'année.

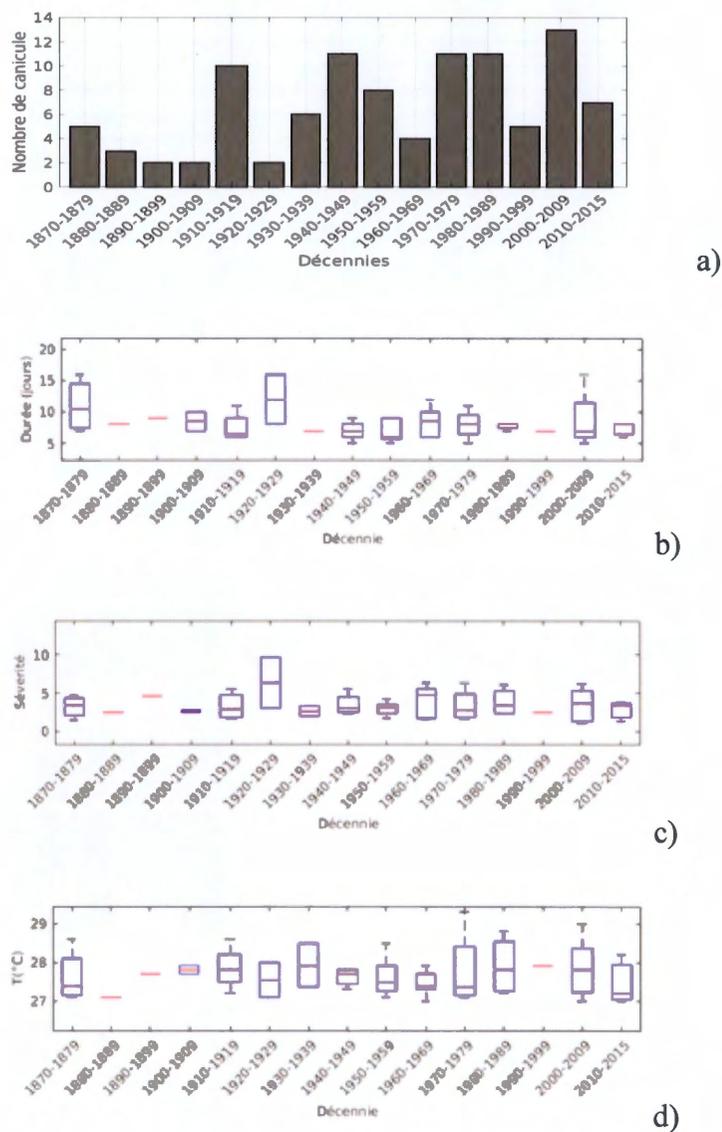


Figure 3.3 Différentes caractéristiques des vagues de chaleur pour la station Montréal McTavish pour la période de 1870 à 2015. Le panneau a) présente l'évolution du nombre de vagues de chaleur par décennies, et les panneaux b), c) et d) présentent, respectivement, les boîtes à moustache des durées (en jour) par décennie, des sévérités par décennie et de la température moyenne maximale (en °C) par décennie.

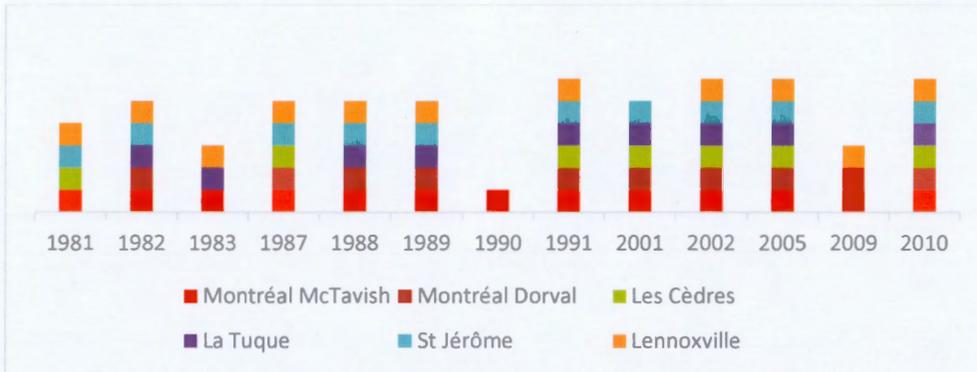


Figure 3.4 Histogramme des années où l'on a détecté une vague de chaleur aux différentes stations météorologiques (Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, St-Jérôme et Lennoxville) sur la période de 1981 à 2010.

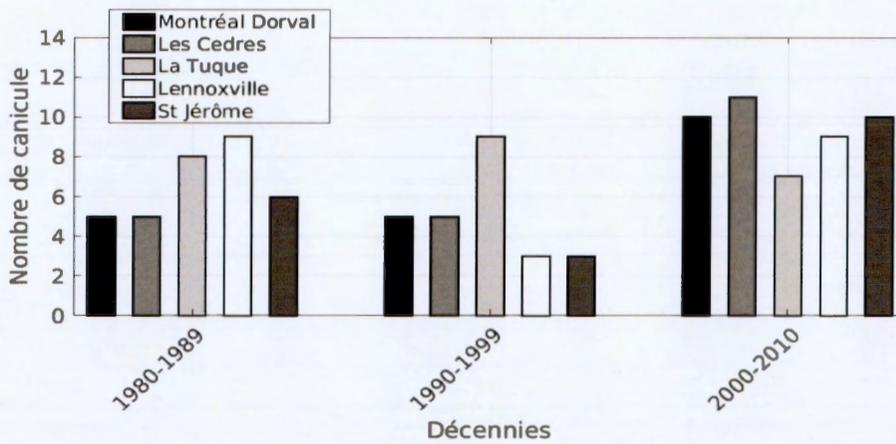


Figure 3.5 Évolution du nombre de vagues de chaleur pour les différentes stations météorologiques (Montréal Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme) par décennie de 1980 à 2009 Les décennies sont représentées sur l'axe des abscisses et le nombre de vagues de chaleur est représenté sur l'axe des ordonnées.

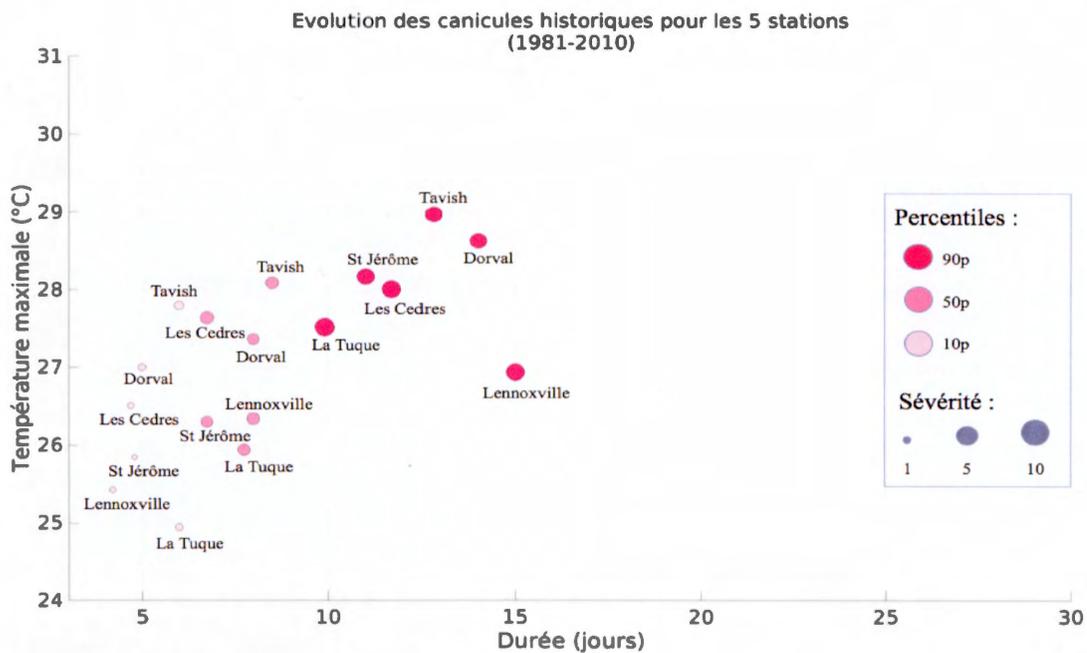


Figure 3.6 Identification des 10^e, 50^e et 90^e centiles des paramètres des vagues de chaleur pour les différentes stations (McTavish, Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme) pour la période de 1981 à 2010. Les 10^e centiles (bulle rose très claire), 50^e centiles (bulle rose claire) et les 90^e centiles (bulle rose foncée) de la TM, de la durée et de la sévérité des vagues de chaleur sont représentés. L'axe des abscisses représente la durée en jour et l'axe des ordonnées représente les températures moyennes maximales en degrés Celsius. La sévérité est associée à la grosseur de la bulle.

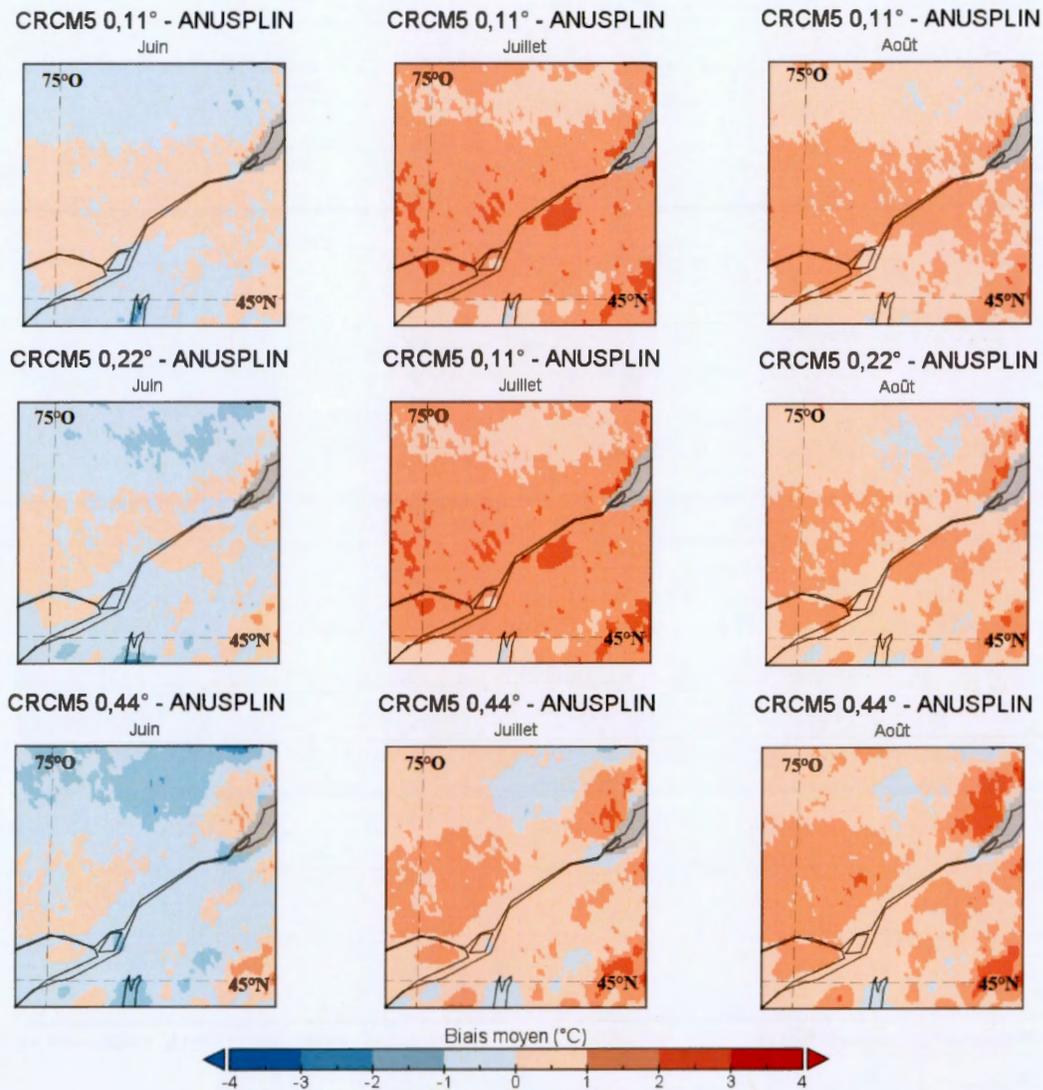


Figure 3.7 Biais moyens (MRCC5 – ANUSPLIN, en °C) des Tmoy climatiques mensuelles des mois de juin à août calculés pour la période de 1981 à 2010, en utilisant les trois résolutions du MRCC5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM à 0,11 °, 0,22 ° et 0,44 °. La région est la même que celle présentée à la Figure 2.1.

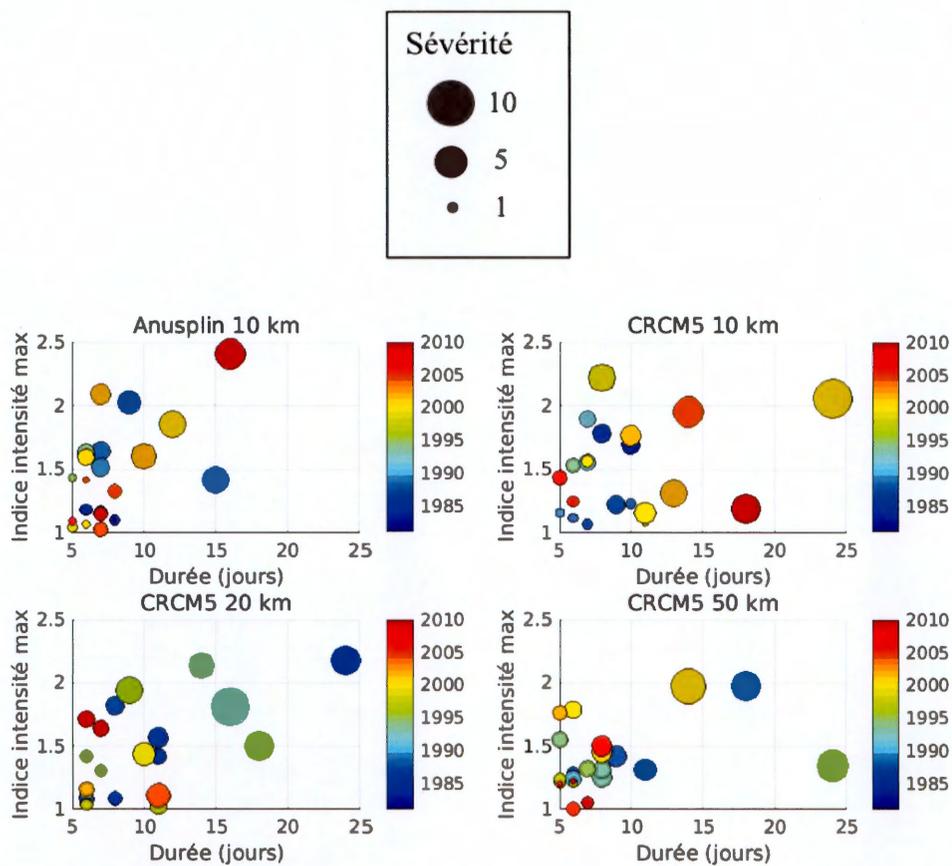


Figure 3.8 Vagues de chaleur détectées pour les données de grille (ANUSPLIN et modèle MRCC5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM selon 3 résolutions à 10, 20 et 50 km) sur la période de 1981 à 2010. L'axe des ordonnées correspond à l'indice d'intensité maximale, l'axe des abscisses représente la durée en jour, la taille des bulles représente la sévérité d'une vague de chaleur et la couleur des bulles correspond à l'année.

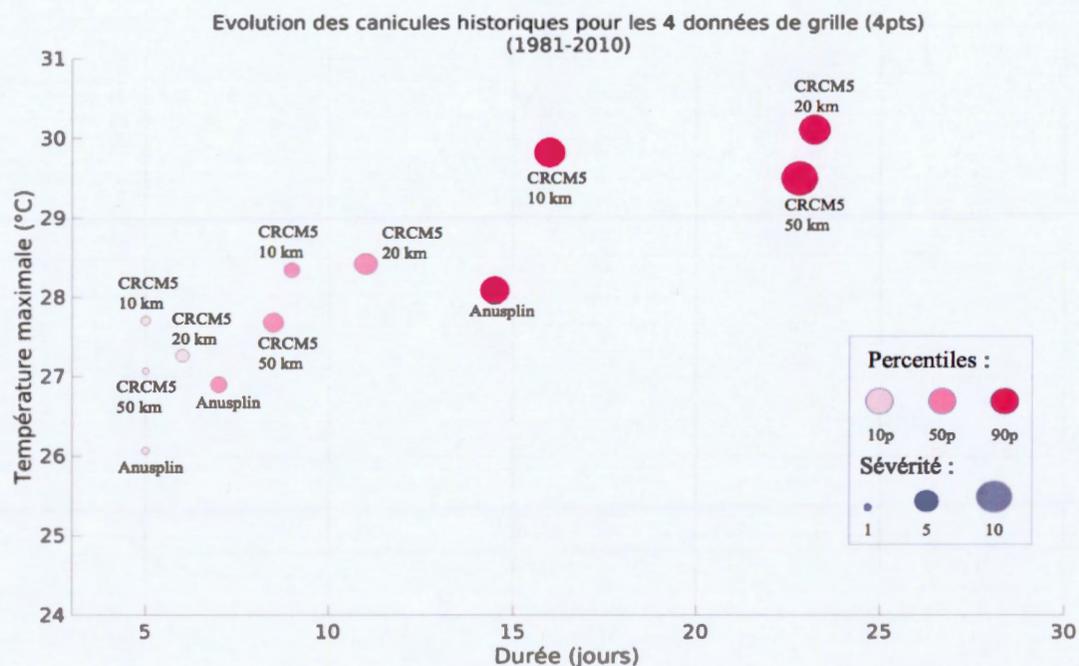


Figure 3.9 Identification des 10^e, 50^e et 90^e centiles des paramètres des vagues de chaleur pour les données de grille (ANUSPLIN et modèle CRCM5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM selon 3 résolutions à 10, 20 et 50 km) pour la période de 1981 à 2010. Les 10^e centiles (bulle rose très claire), 50^e centiles (bulle rose claire) et les 90^e centiles (bulle rose foncée) des TM, de la durée et de la sévérité des vagues de chaleur sont représentés. L'axe des abscisses correspond à la durée en jour et l'axe des ordonnées représente les températures moyennes maximales en °C. La sévérité est associée à la grosseur de la bulle.

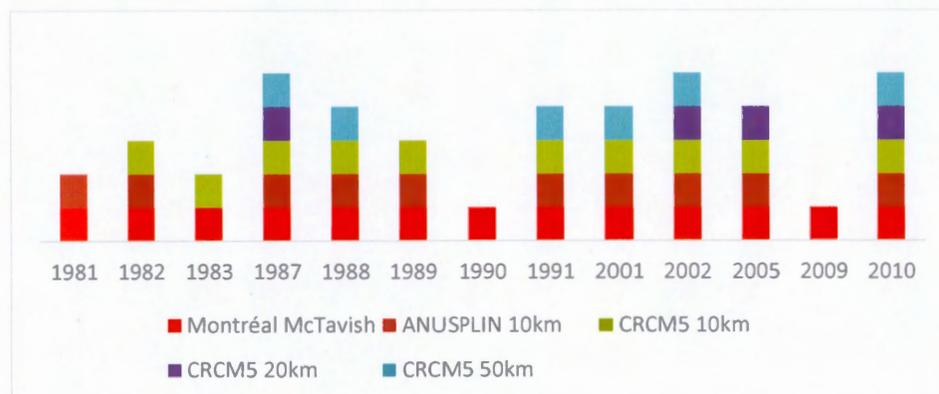


Figure 3.10 Histogramme des années où l'on a détecté une vague de chaleur à Montréal McTavish et celle détectée à partir des données ANUSPLIN et du modèle CRCM5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM aux trois résolutions (10 km, 20 km et 50 km) pour la période de 1981 à 2010.

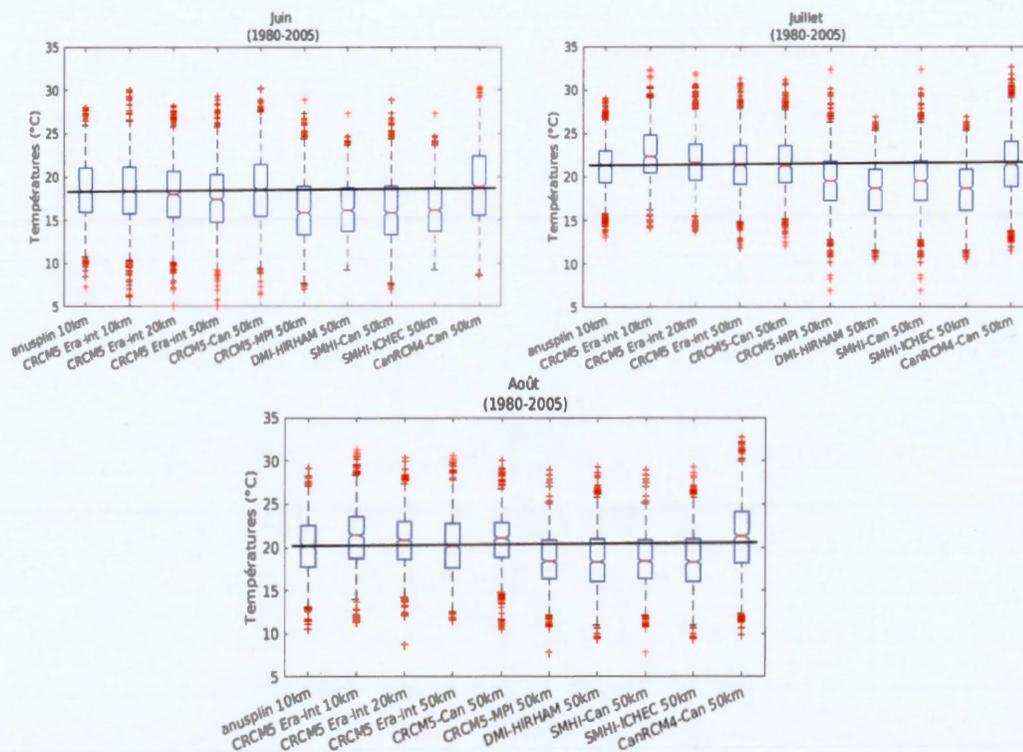


Figure 3.11 Boîtes à moustache de la distribution des T_{moy} des mois de juin à août sur une période commune de 1980 à 2005. Les T_{moy} sont calculées à partir de quatre points de grille autour de Montréal McTavish moyennés pour les données ANUSPLIN, du modèle MRCC5 piloté avec les réanalyses ERA-INTERIM (3 résolutions) et des modèles régionaux pilotés avec les MGCs. Les données ANUSPLIN correspondent aux données de référence (ligne noire correspond à la médiane calculée à partir des données ANUSPLIN).

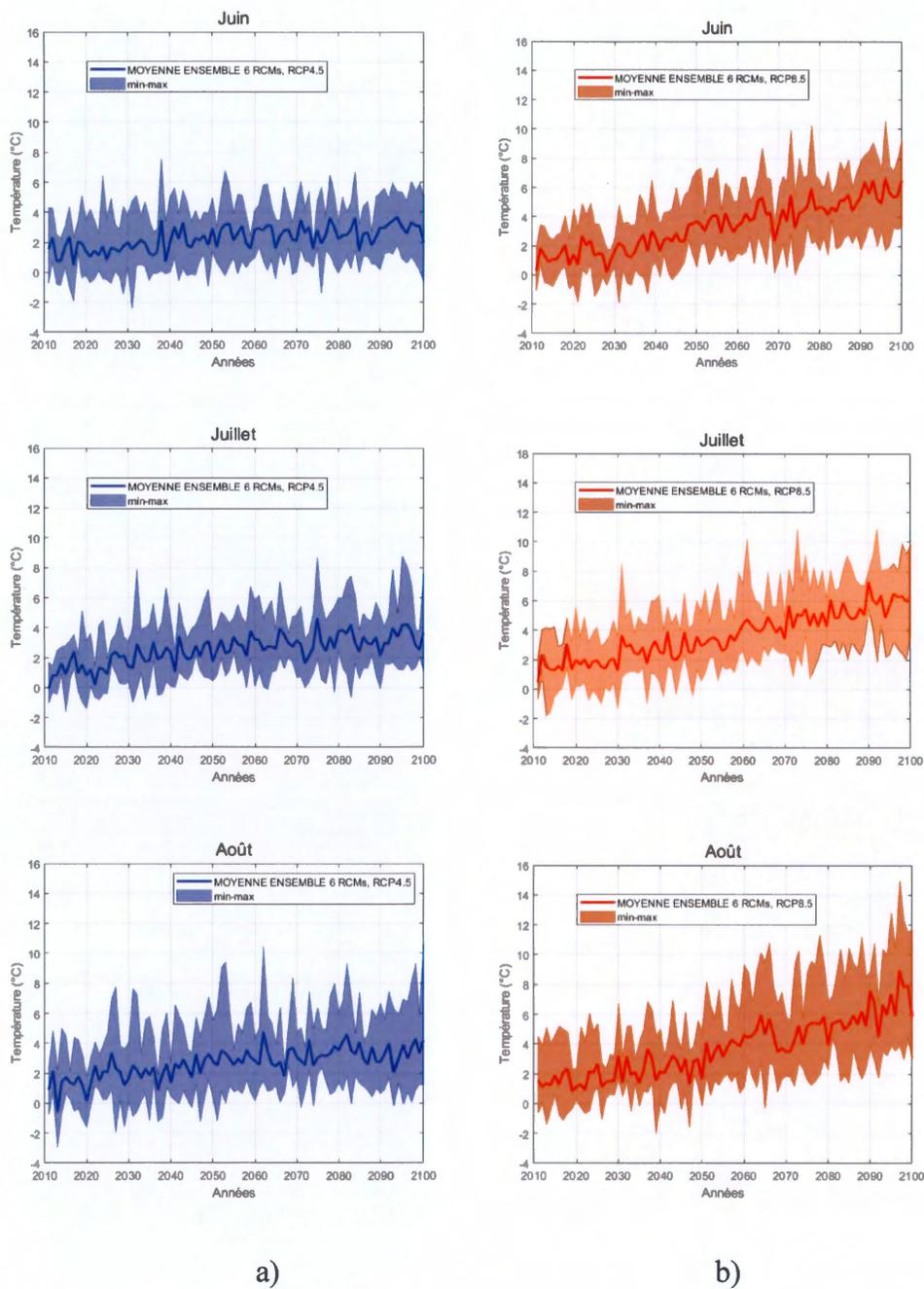


Figure 3.12 Anomalies interannuelles de 2011 à 2100 (par rapport à la période de référence 1971-2000) des T_{moy} pour les mois de juin, juillet et août (pour les quatre points de grille autour de Montréal McTavish pour a) le scénario RCP4.5, et b) le

scénario RCP8.5. Dans chacun des panneaux, la ligne bleue/ rouge foncée correspond à la moyenne d'ensemble des 6 RCMs (présentés au Tableau 2.2), et les zones ou intervalles bleu/ rouge représentent les valeurs maximales ou minimales obtenues parmi les six modèles utilisés.

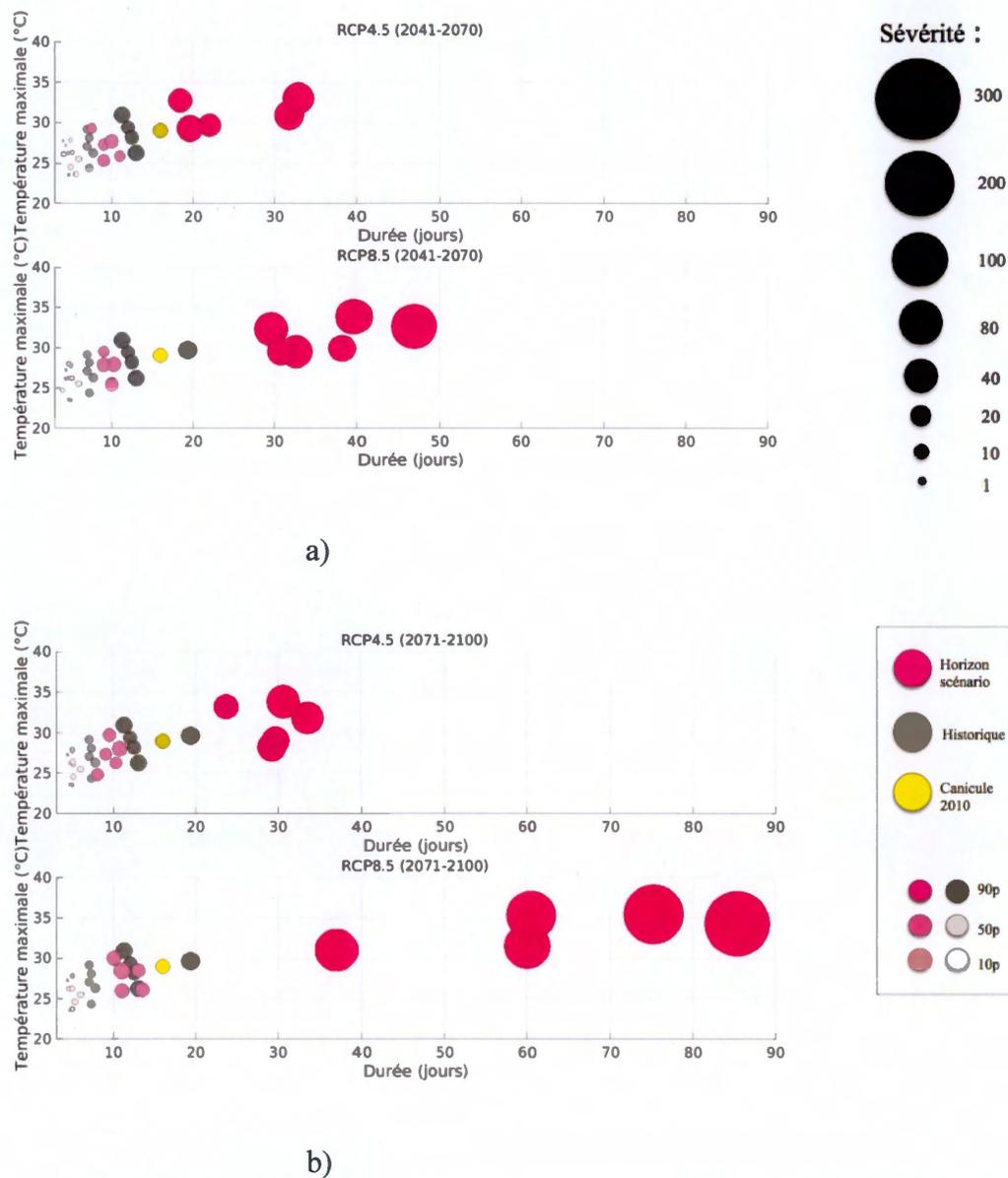


Figure 3.13 Évolution des 10^e, 50^e et 90^e centiles des caractéristiques des vagues de chaleur pour chaque modèle et pour chaque période future, a) 2041-2070 et b) 2071-2100, pour les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par rapport aux valeurs pour la période historique. Les bulles grises représentent les vagues de chaleur historiques, les bulles roses représentent les vagues de chaleur futures et la bulle jaune représente la vague de chaleur 2010. Les 10^e centiles (bulle très claire) représentent la valeur du 10^e

centile en termes de TM, de durée et de sévérité, les 50^e centiles (bulle claire) représentent la valeur médiane et les 90^e centiles (bulle foncée) représentent la valeur du 90^e centile des paramètres (TM, de durée et de sévérité). L'axe des abscisses représente la durée (en jour) et l'axe des ordonnées représente les TM (en °C). La sévérité est associée à la grosseur de la bulle.

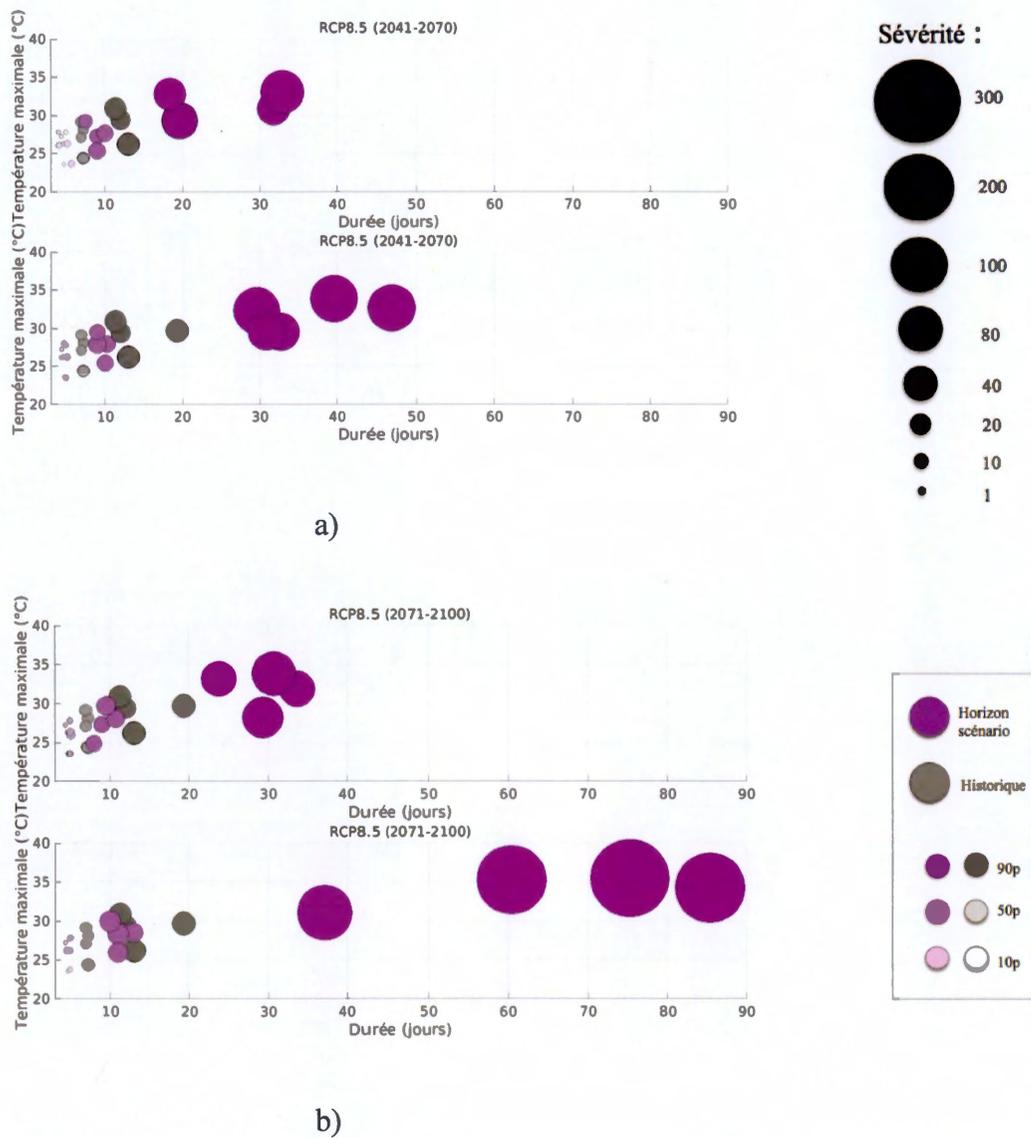


Figure 3.14 Idem à la Figure 3.13 mais en ajoutant l'indice Humidex pour la sévérité.

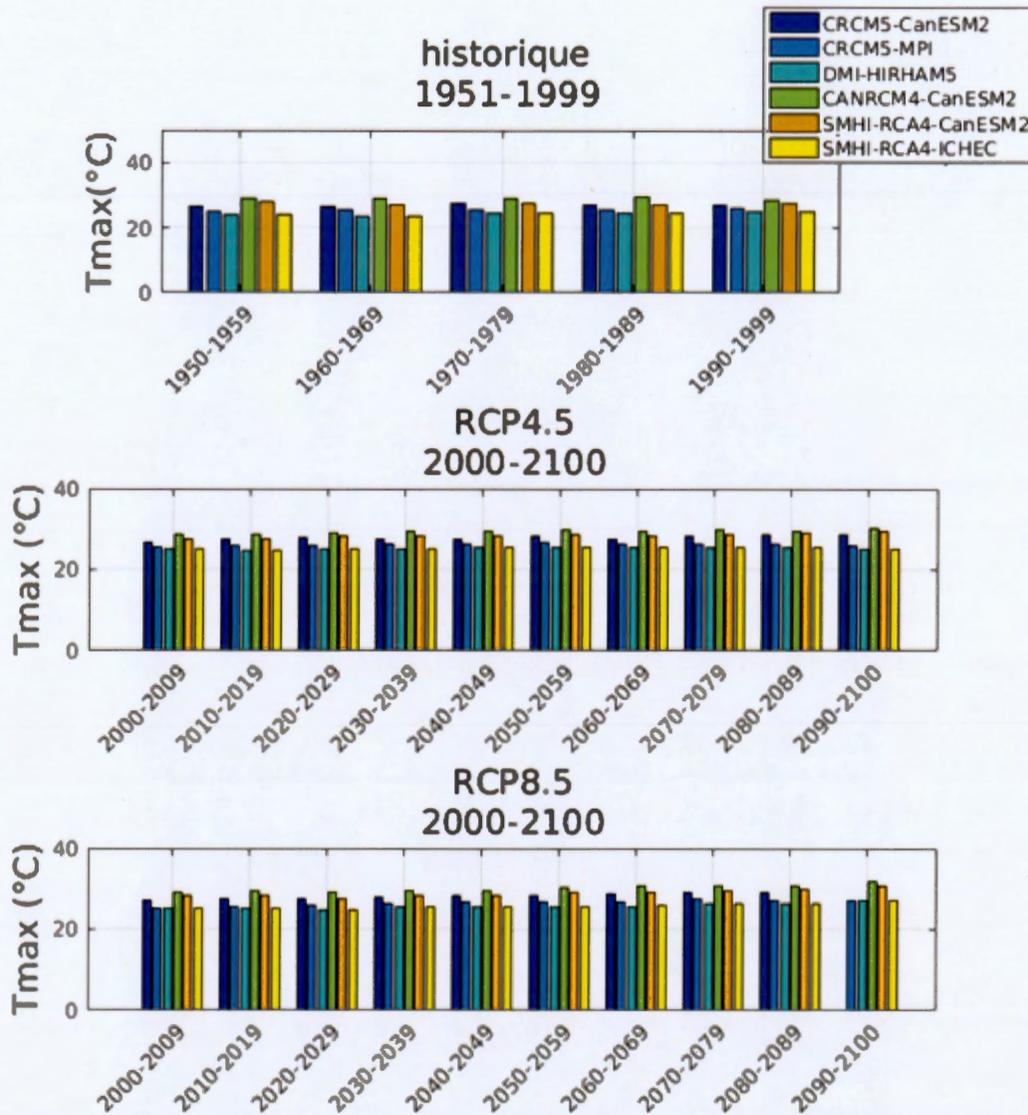


Figure 3.15 Évolution décennale de la Tmax maximale par décennie (en °C) des mois de mai à septembre pour les différents modèles régionaux pilotés en mode MGC sur la période historique (1950-1999, panneau du haut) et les périodes actuelles et futures (2000-2100) pour les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (panneaux du milieu et du bas, respectivement).

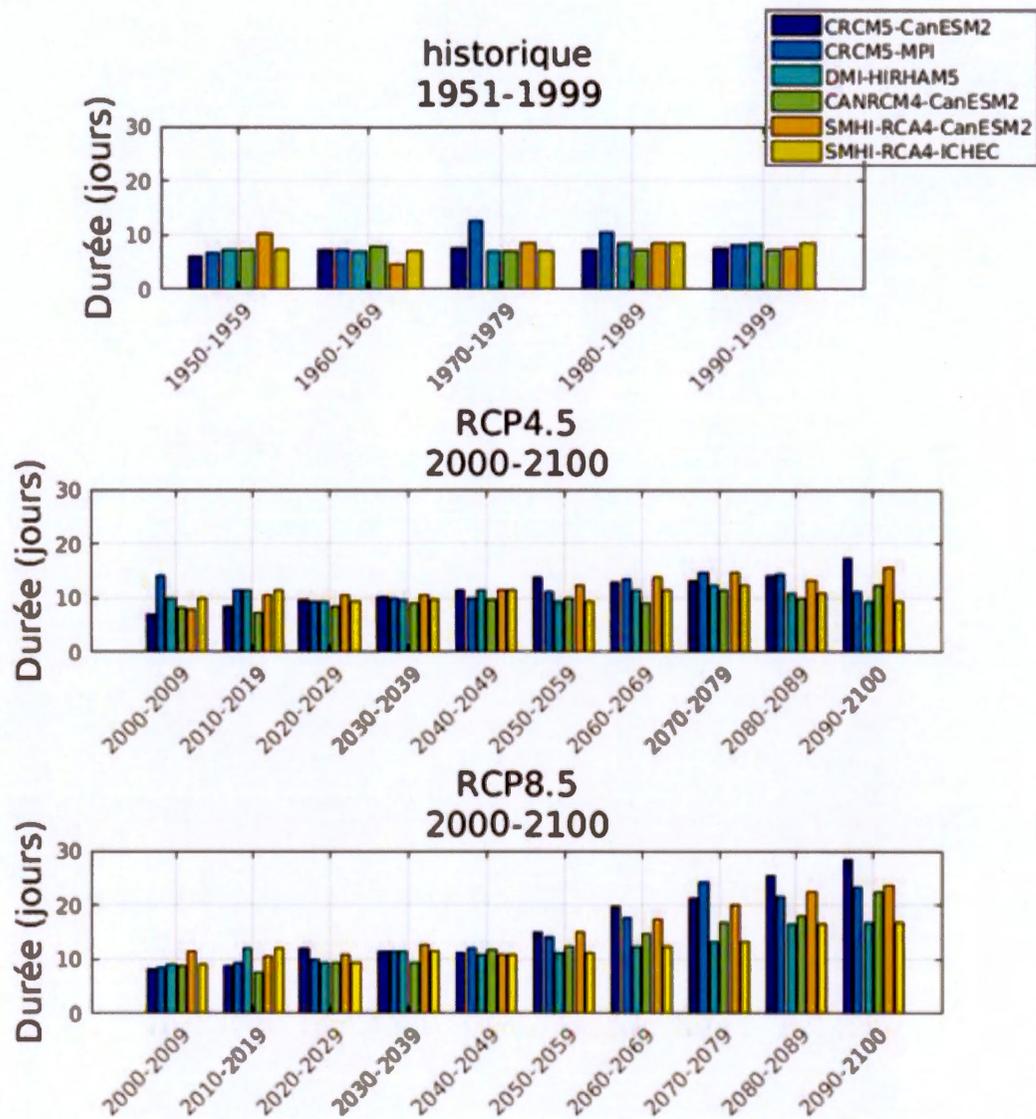


Figure 3.16 Idem à la Figure 3.15 mais pour la durée des canicules.

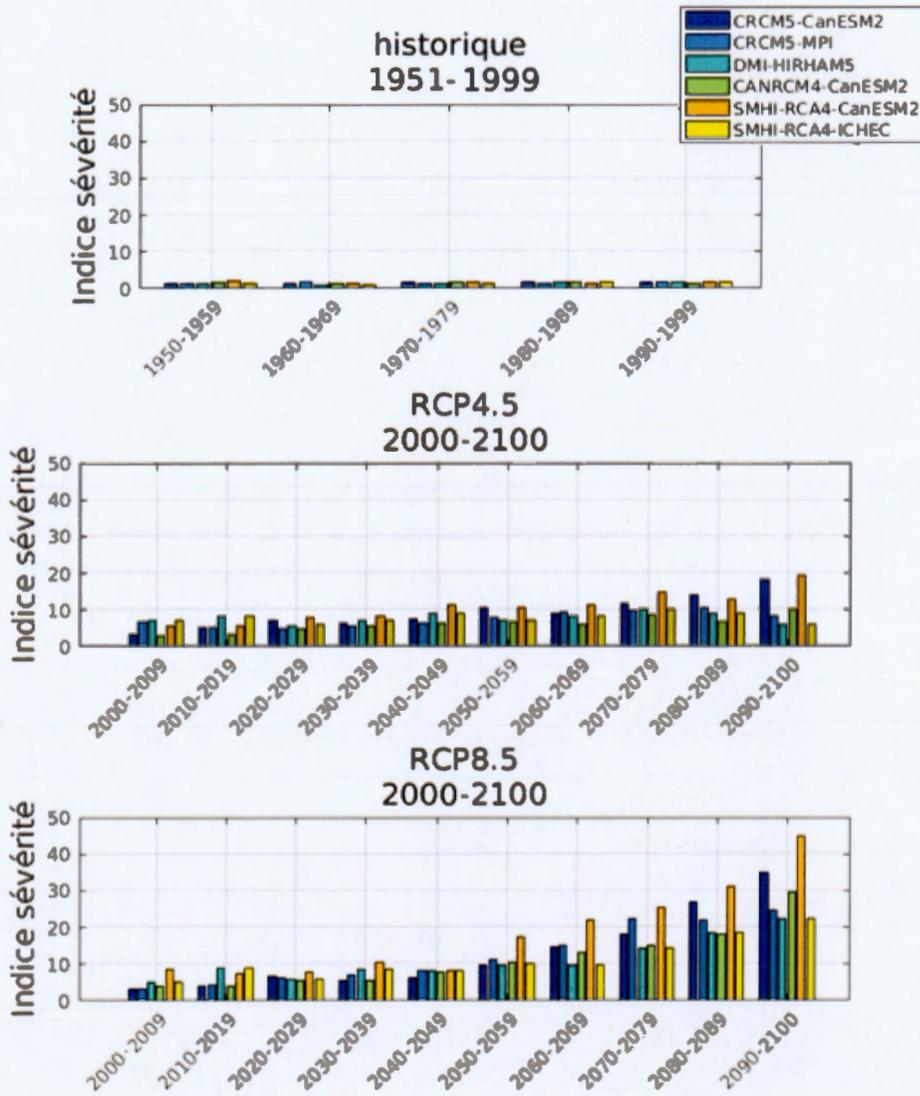


Figure 3.17 Idem à la Figure 3.15 mais pour la sévérité des canicules.

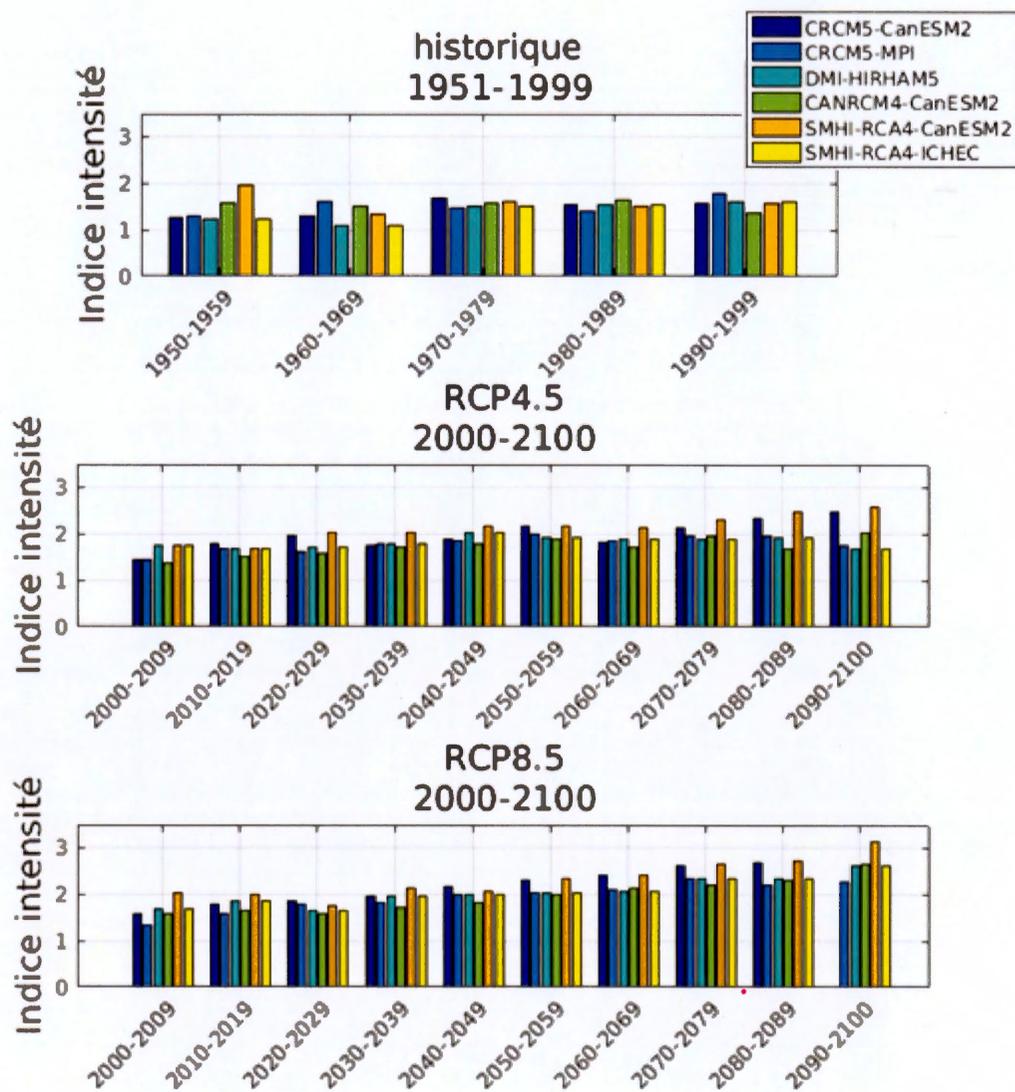


Figure 3.18 Idem à la Figure 3.15 mais pour l'intensité des canicules.

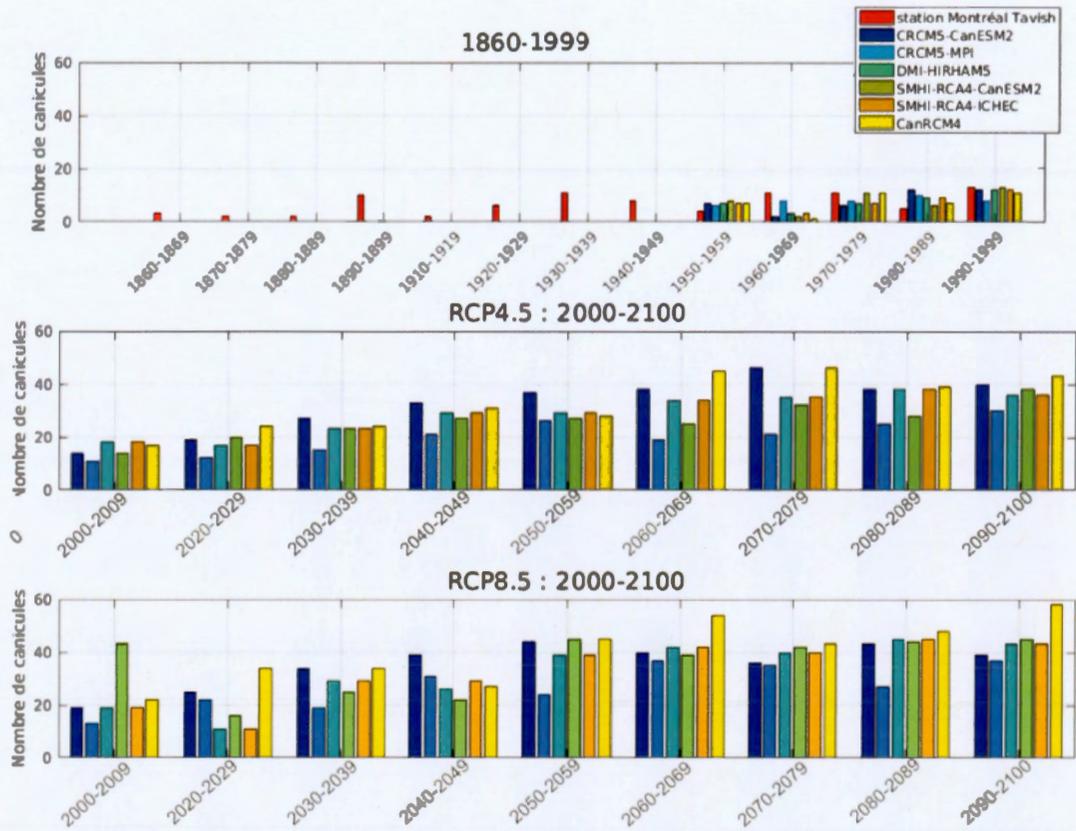


Figure 3.19 Idem à la Figure 3.15 mais pour le nombre de canicules et en utilisant les séries observées de 1870 à 2015 pour la station de Montréal McTavish.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Une méthode de détection des vagues de chaleur, mise au point par Météo-France en France, a été adaptée et appliquée au Québec. Celle-ci permet de tenir compte de critères multivariés, en particulier afin de caractériser la sévérité et l'intensité d'un événement à partir des valeurs seuils (95^e, 97,5^e et 99,5^e centiles) atteintes par la température moyenne quotidienne, selon une durée minimale d'au moins trois jours durant une période estivale « allongée » (mai à septembre). L'intégration des facteurs d'occurrence, de durée, d'intensité et de sévérité ont ainsi permis d'identifier que les canicules comme celles de 2010, se produiront de façon plus durable et sévère dans le futur, ce qui pourrait constituer un problème sanitaire majeur d'ici 2050. Selon le scénario RCP8.5, les vagues de chaleur les plus extrêmes pourraient être d'une durée allant jusqu'à 85 jours, soit persister durant la majeure partie de l'été. L'augmentation des températures favorisera en effet des valeurs quasi systématiquement au-dessus des seuils de détection basés sur les séries historiques. Toutefois, notre étude ne peut constituer qu'une première étape vers une estimation plus robuste qui tiennent compte à la fois des changements dans la distribution statistique des températures dans le futur, et de l'adaptation physiologique des individus qui évoluera dans le temps. Ceci devra se faire via une analyse régulière des impacts sanitaires dans les conditions de chaleur accablantes alors que la vulnérabilité de la population et son exposition évolueront dans le temps.

Par ailleurs, l'utilisation de centiles par rapport à des seuils absolus (Ex : Tmax 33°C et Tmin = 20°C utilisé par Martel *et al.*, 2010) rend cette méthode plus flexible spatialement, et permettent de tenir compte des conditions climatiques locales. Toutefois, cette méthode devrait être adaptée ou validée à partir d'autres études basées sur la santé humaine et les impacts sur les taux de mortalité/ morbidité.

En outre, la présente étude a ses limites, notamment en raison du nombre limité de MRCs utilisés et de la variabilité intra-modèle parfois très élevée (incertitudes élevées). Par exemple, des différences de plus de 90 dans les valeurs de sévérité ont été obtenues entre certains modèles, le plus souvent dues à des biais importants dans l'intensité et la durée des Tmoy simulées. D'autres analyses seraient sans doute utiles pour inclure soit plus de MRCs, ou évaluer précisément le niveau d'incertitude à partir des simulations disponibles, ou encore identifier si les modèles pilotés MGCs et les MRCs reproduisent les conditions synoptiques responsables de l'occurrence et de la durée d'une canicule (ex. via l'évaluation des blocages atmosphériques) telles qu'observées.

De plus, l'ajout du critère Humidex dans notre étude est restée simple (additif dans notre cas), et nécessiterait une analyse plus approfondie pour vérifier l'occurrence conjointe de critères seuils de températures et d'indice humidex afin notamment d'éviter certaines valeurs aberrantes obtenues et d'inclure plus précisément l'effet de l'humidité relative de l'air dans la sévérité des canicules.

D'autres facteurs pourraient être ajoutés, comme la qualité de l'air, qui affecte l'inconfort ou à des effets directs et indirects au niveau sanitaire. Au Canada, une vague de chaleur est souvent accompagnée de smog, qui accentue les conséquences sanitaires lorsque le corps humain est soumis à une chaleur intense (Séguin et Berry, 2008). Il serait intéressant de créer un critère conjoint d'humidité de l'air et de qualité de l'air ou un indice climatique thermique qui combine l'effet sur la santé humaine comme l'Universal Thermal Climate Index (UTCI) développé par Pappenberger *et al.* (2015). Cet indice combine des facteurs thermiques et sanitaires comme, entre autres,

l'équilibre thermique et la physiologie du corps humain. Il permet des applications en bio météorologie humaine. Il est également utile pour la prévision quotidienne et les avertissements, la gestion urbaine, l'aménagement du territoire, l'épidémiologie environnementale et la recherche sur les impacts climatiques (Pappenberger *et al.*, 2015).

CHAPITRE V

CONCLUSION

Cette étude avait pour but d'évaluer la distribution régionale des risques de canicule dans le sud du Québec, afin d'aider à mieux anticiper les impacts sanitaires potentiels (facteurs d'exposition sur le territoire). Elle a permis d'évaluer le potentiel d'une approche multicritère développée par Météo-France, dans le contexte climatique québécois. Un indice de sévérité, qui est fonction de la durée et de l'intensité de la vague de chaleur, a ainsi pu être testé et évalué dans les conditions actuelles et futures. Cette méthode a été utilisée à partir des séries observées de plusieurs stations météorologiques (Montréal McTavish, Montréal Dorval, Lennoxville, Les Cèdres, La Tuque et St-Jérôme), mais également à partir de modèles régionaux pilotés soit par des réanalyses, soit par des MGCs. Une estimation des changements futurs dans les caractéristiques des vagues de chaleur au Québec a été réalisée pour les périodes de 2011 à 2100 en utilisant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les projections régionales des canicules ont été développées à l'aide de simulations issues du projet CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment ; Mearns *et al.*, 2013).

La méthode utilisée est basée sur le dépassement des 95^e, 97,5^e et 99,5^e centiles des températures quotidiennes moyennes, qui déterminent l'interruption et le début de la canicule, et selon une durée minimale de trois jours consécutifs. Ces seuils ont été comparés à ceux déterminés par les instituts sanitaires.

D'après les observations historiques, plusieurs années caniculaires ont été observées conjointement aux cinq stations météorologiques étudiées (Dorval, Les Cèdres, La Tuque, Lennoxville et St-Jérôme). Parmi celles-ci, on retrouve l'année 2010, qui fut la plus sévère des trente dernières années. Les canicules les plus extrêmes (90^e centiles du TM, de la durée et de la sévérité) observées à Montréal McTavish (sur une longue période de 1870 à 2015) ont permis de montrer que le Tmoy peut dépasser les 28 °C, et que la durée peut être de 12,5 jours avec une sévérité de 6.

Les résultats issues des données historiques simulées ont révélé que les données ANUSPLIN obtenaient des caractéristiques caniculaires très proches de celles obtenues à la station Montréal McTavish, en particulier pour la canicule de 2010. En ce qui concerne le modèle MRCC5, la résolution du modèle à 10 km détecte plus souvent les canicules observées que le modèle utilisant des résolutions plus grossières (20 km et 50 km), qui sous-estiment le plus souvent leur occurrence. Cependant, la valeur ajoutée reliée à une résolution plus fine n'est pas systématique et dépend du mois et du secteur concerné, en particulier selon la présence ou non de relief marqué (biais en général moins élevé avec le modèle utilisant une résolution plus fine).

Dans le futur, la moyenne d'ensemble des six simulations de MRCs utilisés révèle que 50 % des vagues de chaleur seront de la même sévérité et intensité que la canicule de 2010, d'ici le milieu du 21^e siècle (2041 à 2070). Dans le même temps, les canicules les plus sévères, basés sur les 90^e centiles des paramètres étudiés, pourraient avoir des durées deux fois plus longues pour les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5), et de trois fois (RCP4.5) à six fois (RCP8.5) plus sévères par rapport aux vagues de chaleur historiques. D'ici la fin du 21^e siècle, ces durées et sévérités des canicules les plus intenses pourraient s'accroître, jusqu'à cinq fois plus longues et quatorze fois plus sévères (pour le scénario RCP8.5). Tout ceci est particulièrement préoccupant d'un point de vue sanitaire.

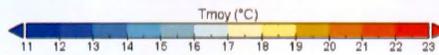
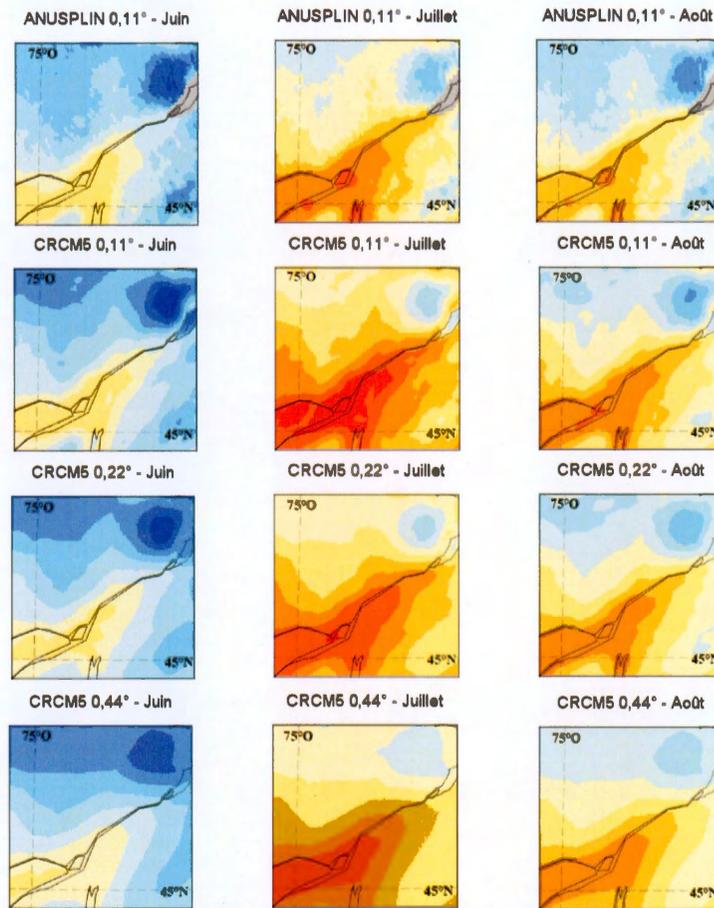
L'inclusion de l'indice Humidex accentuerait la sévérité des canicules, qui pourrait devenir de quatre/dix fois plus élevée selon le scénario RCP4.5/RCP8.5 que dans les conditions historiques. Tout ceci se réalise dans le contexte d'une augmentation de la température moyenne maximale de 3,5 °C/5,5 °C (au cours de l'été), et de 3 à 8 °C selon le mois de la T_{moy} selon le mois considéré (selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, respectivement)..

Cette augmentation dans l'intensité, l'occurrence, la durée et la sévérité des vagues de chaleur dans le futur ne se limite pas à la région autour de Montréal, mais affecte également d'autres secteurs du sud du Québec (non analysés en détail dans ce travail). Ainsi, la méthode utilisée dans cette étude mériterait d'être évaluée ou testée dans le cadre d'études basées sur la santé humaine, notamment afin d'évaluer les critères de sévérité et d'intensité sur les taux de mortalité/ morbidité.

Les limites de cette étude résident en partie dans l'utilisation de l'indice Humidex qui mériterait d'être plus complètement utilisé et exploité dans des études subséquentes. L'intégration dans la méthode de critère d'occurrence conjointe dans les seuils de température et de valeurs de l'indice Humidex serait à privilégier. Il serait également pertinent d'intégrer un critère de qualité de l'air et d'évaluer son potentiel (approche multivariée) dans un contexte d'impacts sanitaires ou d'effets sur la mortalité/morbidité. L'inclusion d'un plus grand nombre de MRCs devraient être également privilégiée, incluant une évaluation explicite des incertitudes associées aux événements caniculaires projetés selon les différents scénarios RCPs.

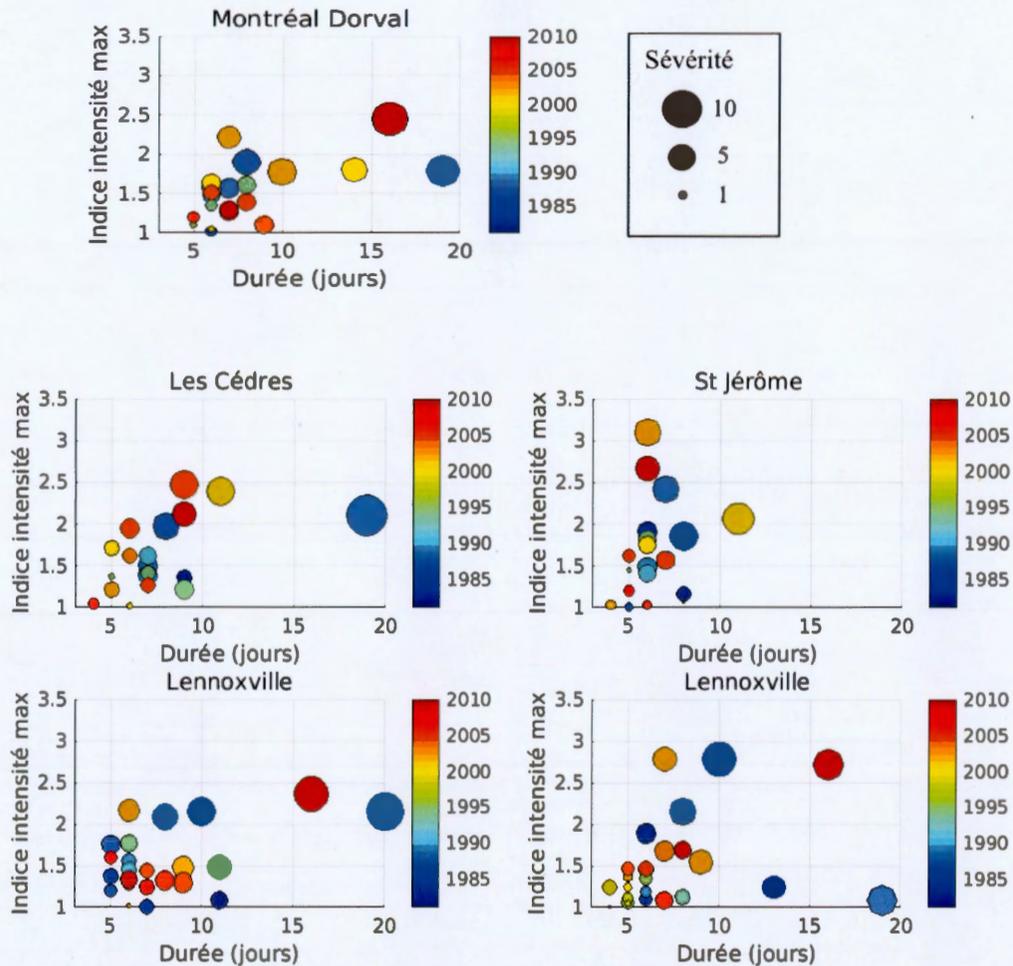
ANNEXE A :

MOYENNES CLIMATOLOGIQUES DES TMOY POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET, AOÛT CALCULÉES SUR LA PÉRIODE DE 1981 À 2010 À PARTIR DES DONNÉES ANUSPLIN ET DU MODÈLE CRCM5 PILOTÉ PAR LES RÉANALYSES ERA-INTERIM UTILISANT DIFFÉRENTES RÉOLUTIONS (0,11°,0,22° ET 0,44°)



ANNEXE B :

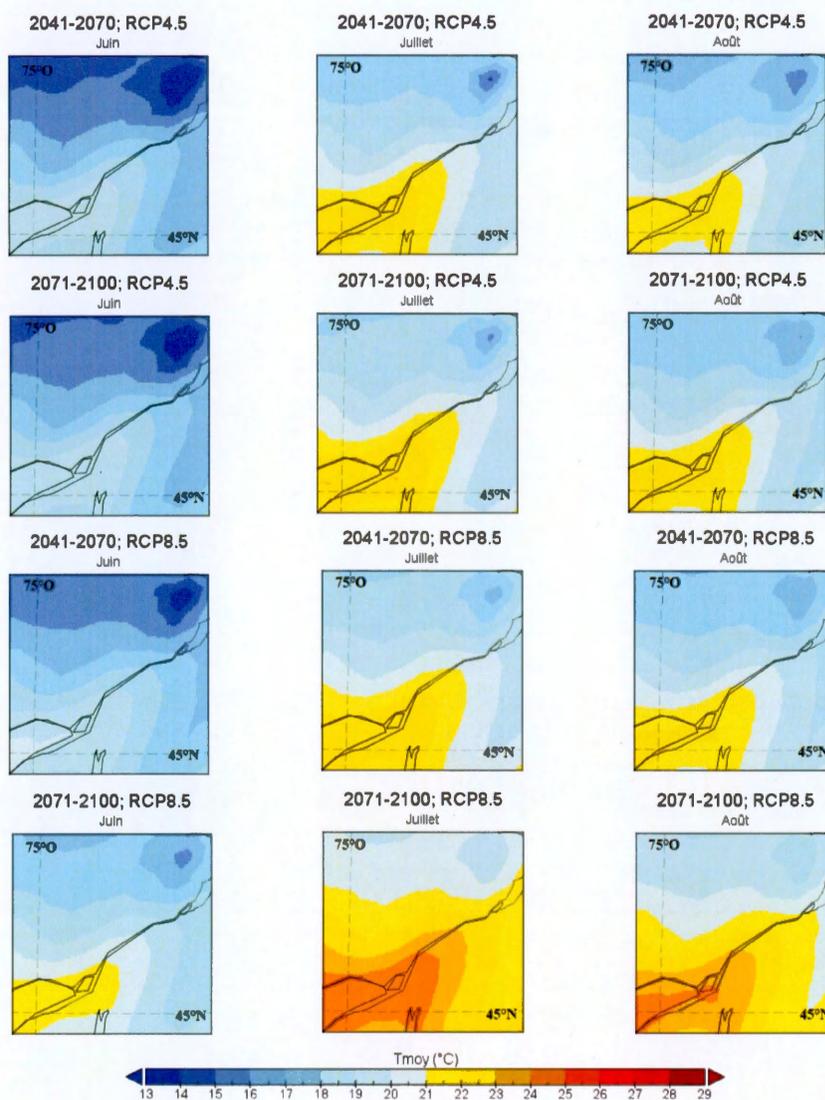
DIAGRAMME À BULLE POUR LES DIFFÉRENTES STATIONS
MÉTÉOROLOGIQUES, PÉRIODE CLIMATOLOGIQUE : 1981-2010



Annexe B Vagues de chaleur détectées pour les différentes stations météorologiques sur la période de 1981 à 2010. L'axe des ordonnées représente l'indice d'intensité maximale, l'axe des abscisses représente la durée en jour, la taille des bulles représente la sévérité d'une vague de chaleur et la couleur des bulles correspond à l'année qui a détecté une vague de chaleur.

ANNEXE C :

MOYENNES CLIMATOLOGIQUES DES TMOY POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET ET AOÛT POUR LES PÉRIODES FUTURES DE 2041-2070 ET 2071-2100 À PARTIR DES MOYENNES D'ENSEMBLE ISSUES DES MODÈLES RÉGIONAUX PILOTÉS PAR LES MODÈLES GLOBAUX DU CLIMAT



RÉFÉRENCES

- Alvarez-Castro, M. C., Faranda, D., & Yiou, P. (2016). Atmospheric dynamics and West European summer hot temperatures since 1871.
- Benmarhnia, T., Sottile, M. F., Plante, C., Brand, A., Casati, B., Fournier, M., & Smargiassi, A. (2014). Variability in temperature-related mortality projections under climate change. *Environmental health perspectives*, 122(12), 1293.
- Bessemoulin, P., Bourdette, N., Courtier, P., & Manach, J. (2004). La canicule d'août 2003 en France et en Europe.
- Betts, R. A., Collins, M., Hemming, D. L., Jones, C. D., Lowe, J. A., & Sanderson, M. G. (2011). When could global warming reach 4 C? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1934), 67-84.
- Bouchama, A., Dehbi, M., Mohamed, G., Matthies, F., Shoukri, M., & Menne, B. (2007). Prognostic factors in heat wave-related deaths: a meta-analysis. *Archives of internal medicine*, 167(20), 2170-2176.
- Bridger, C. A., Ellis, F. P., & Taylor, H. L. (1976). Mortality in St. Louis, Missouri, during heat waves in 1936, 1953, 1954, 1955, and 1966: Coroner's cases. *Environmental Research*, 12(1), 38-48.
- Bustinza, R., Lebel, G., Gosselin, P., Bélanger, D., & Chebana, F. (2013). Health impacts of the July 2010 heat wave in Quebec, Canada. *BMC public health*, 13(1), 56.
- Carrera, M. L., Higgins, R. W., & Kousky, V. E. (2004). Downstream weather impacts associated with atmospheric blocking over the northeast Pacific. *Journal of Climate*, 17(24), 4823-4839.
- Casati, B., Yagouti, A., & Chaumont, D. (2013). Regional climate projections of extreme heat events in nine pilot Canadian communities for public health planning. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(12), 2669-2698.

- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST). 2005. Guide santé sécurité du travail dans les environnements chauds. CCHST, Hamilton (Ont.), p. 106.
- Changnon, S. A., Kunkel, K. E., & Reinke, B. C. (1996). Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action. *Bulletin of the American Meteorological society*, 77(7), 1497-1506.
- Chebana, F., Martel, B., Gosselin, P., Giroux, J. X., & Ouarda, T. B. (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.
- Cholette, M., Laprise, R., & Thériault, J. M. (2015). Perspectives for very high-resolution climate simulations with nested models: illustration of potential in simulating St. Lawrence River Valley channelling winds with the fifth-generation Canadian regional climate model. *Climate*, 3(2), 283-307.
- Choi, J., & Meentemeyer, V. (2002). Climatology of persistent positive temperature anomalies for the contiguous United States (1950-1995). *Physical Geography*, 23(3), 175-195.
- Christidis, N., Stott, P. A., Brown, S., Karoly, D. J., & Caesar, J. (2007). Human contribution to the lengthening of the growing season during 1950-99. *Journal of Climate*, 20(21), 5441-5454.
- CNES, Communiqué de presse, 23 septembre 2003 : <https://cnes.fr/fr/web/CNES-fr/901-cp61-2003-les-consequences-de-la-secheresse-vues-de-lespace.php>
- CNRS, Communiqués de presse, 2 décembre 2013 : <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqué/3347.htm>
- Corso, M., Pascal, M., & Wagner, V. (2017). Impacts de la chaleur et du froid sur la mortalité totale en France entre 2000 et 2010. *Bull Epidémiol Hebd*, 31, 634-40.
- Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., & Staniforth, A. (1998). The operational CMC-MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation. *Monthly Weather Review*, 126(6), 1373-1395.
- Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature climate change*, 2(7), 491.

- Coumou, D., & Robinson, A. (2013). Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034018.
- Coumou, D., Robinson, A., & Rahmstorf, S. (2013). Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures. *Climatic Change*, 118(3-4), 771-782.
- De Elfa, R., Laprise, R., Biner, S., & Merleau, J. (2017). Synchrony between reanalysis-driven RCM simulations and observations: variation with time scale. *Climate Dynamics*, 48(7-8), 2597-2610.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., & Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597.
- Diaconescu, E. P., Gachon, P., Laprise, R., & Scinocca, J. F. (2016). Evaluation of precipitation indices over North America from various configurations of regional climate models. *Atmosphere-Ocean*, 54(4), 418-439.
- Dibike, Y. B., Gachon, P., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., & Nguyen, V. T. V. (2008). Uncertainty analysis of statistically downscaled temperature and precipitation regimes in Northern Canada. *Theoretical and Applied Climatology*, 91(1-4), 149-170.
- ECCC, (2016):http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/eccc/En84-132-2016-eng.pdf
- ECCC, (2017): <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/trends-variations/ete-2017-fr.pdf>
- ECCC, (2018 a), consulté le 5 juin 2018 : http://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?timeframe=2&StationID=51157&StartYear=1840&EndYear=2018&Day=11&Year=2017&Month=9#
- ECCC, (2018), consulté le 1er juin 2018: http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?searchType=stnName&txtStationName=montr%C3%A9al&searchMethod=contains&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5415&dispBack=0
- Ellis, F. P., Nelson, F., & Pincus, L. (1975). Mortality during heat waves in New York City July 1972 and August and September, 1973. *Environmental research*, 10(1), faitfaidfal-13.

- Eum, H.-I., P. Gachon, R. Laprise and T. Ouarda, (2012): Evaluation of regional climate model simulations versus gridded observed and regional reanalysis products using a combined weighting scheme, *Climate Dynamics* 38, Numbers 7-8, 1433-1457, DOI 10.1007/s00382-011-1149.
- Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P. M., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A. K., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate research*, 19(3), 193-212.
- Gachon, P., Bussi eres, L., Gosselin, P., Raphoz, M., Bustinza, R., Martin, P., ...&Yagouti, A. (2016). *Guide pour l'identification des seuils d'alertes aux canicules au Canada bas es sur les données probantes*. Universit  du Québec   Montréal, Etude et Simulation du Climat à l'Echelle Régionale (ESCER), Montréal, Québec, Canada, 75 p.
- Grubenhoff, J. A., du Ford, K., & Roosevelt, G. E. (2007). Heat-related illness. *Clinical Pediatric Emergency Medicine*, 8(1), 59-64.
- Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(37), E2415-E2423.
- Hernández-Díaz, L., Laprise, R., Sushama, L., Martynov, A., Winger, K., & Dugas, B. (2013). Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Climate Dynamics*, 40(5-6), 1415-1433.
- Hopkinson, R. F., McKenney, D. W., Milewska, E. J., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., & Vincent, L. A. (2011). Impact of aligning climatological day on gridding daily maximum–minimum temperature and precipitation over Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(8), 1654-1665.
- Hutchinson, M. F., McKenney, D. W., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Hopkinson, R. F., Milewska, E., & Papadopol, P. (2009). Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum–maximum temperature and precipitation for 1961–2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4), 725-741.
- INVS (2004):
http://invs.santepubliquefrance.fr/presse/2004/communiqués/risques_meteo/bilan_meteo_canicule_2003.pdf
- INVS (2005):
http://www.invs.sante.fr/publications/2005/sacs_2005/rapport_sacs_2005.pdf

- INVS (2017) : <http://invs.santepubliquefrance.fr/fr/Publications-et-outils/Points-epidemiologiques/Tous-les-numeros/Bourgogne-Franche-Comte/2017/Surveillance-sanitaire-en-region-Bourgogne-et-Franche-Comte.-Point-au-21-septembre-2017>
- IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A Meyer (eds.)] IPCC, Geneva, Switzerland
- Jedrzejewski, F. (2006). *Introduction aux méthodes numériques*. Springer Science & Business Media.
- Jeong, D. I., Sushama, L., Diro, G. T., Khaliq, M. N., Beltrami, H., & Caya, D. (2016). Projected changes to high temperature events for Canada based on a regional climate model ensemble. *Climate dynamics*, 46(9-10), 3163-3180.
- Jones, G. S., Stott, P. A., & Christidis, N. (2008). Human contribution to rapidly increasing frequency of very warm Northern Hemisphere summers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D2).
- Khaliq, M. N., Gachon, P., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., & Bobée, B. (2007). Southern Quebec (Canada) summer-season heat spells over the 1941–2000 period: an assessment of observed changes. *Theoretical and Applied Climatology*, 88(1-2), 83-101.
- Khaliq, M. N., & Gachon, P. (2010). Pacific decadal oscillation climate variability and temporal pattern of winter flows in Northwestern North America. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4), 917-933.

- Keeling, C. D., Chin, J. F. S., & Whorf, T. P. (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 382(6587), 146.
- Kenny, G. P., Yardley, J., Brown, C., Sigal, R. J., & Jay, O. (2010). Heat stress in older individuals and patients with common chronic diseases. *Canadian Medical Association Journal*, 182(10), 1053-1060.
- Klein Tank AMG, Zwiers FW, Zhang X (2009) Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Climate data and monitoring WCDMP-No. 72. WMO-TD No. 1500. p 56.
- Koppe, C., Sari Kovats, R., Menne, B., Jendritzky, G., Wetterdienst, D., & World Health Organization. (2004). Heat-waves: risks and responses.
- Kovats, R. S., & Hajat, S. (2008). Heat stress and public health: a critical review. *Annu. Rev. Public Health*, 29, 41-55.
- Laaidi, K., Ung, A., Wagner, V., Beaudreau, P., & Pascal, M. (2012). Système d'alerte canicule et santé: principes, fondements et évaluation. *Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire*, 19.
- La Presse 29 mai 2015: <http://www.lapresse.ca/international/asi-oceanie/201505/29/01-4873541-inde-la-vague-de-chaleur-la-plus-meurtriere-en-20-ans.php>
- Laprise, R. (1992). The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly weather review*, 120(1), 197-207.
- Laprise, R., Hernández-Díaz, L., Tete, K., Sushama, L., Šeparović, L., Martynov, A., ... & Valin, M. (2013). Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Climate Dynamics*, 41(11-12), 3219-3246.
- Lowe, P. R. (1977). An approximating polynomial for the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*, 16(1), 100-103.
- 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. *Institut National de Santé publique du Québec*.

- Martynov, A., Laprise, R., Sushama, L., Winger, K., Šeparović, L., & Dugas, B. (2013). Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: model performance evaluation. *Climate dynamics*, 41(11-12), 2973-3005.
- Masterson, J. M., & Richardson, F. A. (1979). Humidex: a method of quantifying human discomfort. *Environment*.
- Matthies, F., Bickler, G., Marín, N. C., & Hales, S. (Eds.). (2008). *Heat-health action plans: guidance*. World Health Organization
- McGeehin, M. A., & Mirabelli, M. (2001). The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. *Environmental health perspectives*, 109(Suppl 2), 185.
- McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J., Campbell, K., ... & Owen, T. (2011). Customized spatial climate models for North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12), 1611-1622.
- Mearns, L. O., Gutowski, W. J., Barsugli, J. J., Buja, L., Garfin, G. M., Lettenmaier, D. P., & Leung, L. (2013, December). The development of North America CORDEX. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Mearns, L. O., McGinnis, S., Korytina, D., Arritt, R., Biner, S., Bukovsky, M., ... & Kharin, S. (2017). The NA-CORDEX dataset, version 1.0. *NCAR Climate Data Gateway*. Boulder (CO): *The North American CORDEX Program*.
- Meucci Hugo, (2016). Rapport de stage : Les blocages atmosphériques : liens et téléconnexions avec la circulation atmosphérique extratropicale.
- Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I. R., Powell, F. E., Geronimo, R. C., Bielecki, C.R., ... & Lucas, M. P. (2017). Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7(7), 501.
- Morignat, E., Gay, E., Vinard, J. L., Calavas, D., & Hénaux, V. (2015). Quantifying the influence of ambient temperature on dairy and beef cattle mortality in France from a time-series analysis. *Environmental research*, 140, 524-534.
- Mosier, T. M., Hill, D. F., & Sharp, K. V. (2014). 30-Arcsecond monthly climate surfaces with global land coverage. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2175-2188.

- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., ...& Meehl, G.A. (2010). La prochaine génération de scénarios pour la recherche et l'évaluation du changement climatique. *Nature*, 463 (7282), 747.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2007) L'origine du smog. Info Smog. Accessible au : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/air/infosmog/fiche-form.pdf>.
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., & Nemani, R. R. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386(6626), 698.
- Naughton, M. P., Henderson, A., Mirabelli, M. C., Kaiser, R., Wilhelm, J. L., Kieszak, S. M., ...& McGeehin, M. A. (2002). Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago. *American journal of preventive medicine*, 22(4), 221-227.
- NOAA (2012) CO2 data of US National Oceanic and Atmospheric Administration. ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_gl.txt
- NOAA (2015) Natural Hazard Statistics: Weather Fatalities. National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.weather.gov/om/hazstats.shtml>
- Oke, T. R., & Fuggle, R. F. (1972). Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology*, 2(3), 290-308.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Ouzeau, G., Soubeyroux, J. M., Schneider, M., Vautard, R., & Planton, S. (2016). Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*, 4, 1-12.
- Palecki, M. A., Changnon, S. A., & Kunkel, K. E. (2001). The nature and impacts of the July 1999 heat wave in the midwestern United States: learning from the lessons of 1995. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(7), 1353-1367.
- Pappenberger, F., Jendritzky, G., Staiger, H., Dutra, E., Di Giuseppe, F., Richardson, D. S., & Cloke, H. L. (2015). Global forecasting of thermal health hazards: the skill of probabilistic predictions of the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International journal of biometeorology*, 59(3), 311-323.

- Pascal, M., Wagner, V., Le Tertre, A., Laaidi, K., Honoré, C., Bénichou, F., & Beaudou, P. (2013). Definition of temperature thresholds: the example of the French heat wave warning system. *International journal of biometeorology*, 57(1), 21-29.
- Pezza, A. B., Van Rensch, P., & Cai, W. (2012). Severe heat waves in Southern Australia: synoptic climatology and large-scale connections. *Climate Dynamics*, 38(1-2), 209-224.
- Poumadere, M., Mays, C., Le Mer, S., & Blong, R. (2005). The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. *Riskanalysis*, 25(6), 1483-1494.
- Psychomédia, 8 juillet 2010 : <http://www.psychomedia.qc.ca/environnement/2010-07-08/canicule-effets-sur-la-sante-du-smog-et-de-l-ozone>
- Rong, Y., Su, H., Zhang, R., Tian, J., Chen, S., Yang, Y., & Li, B. (2011). A new physically based method for Air temperature downscaling.
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C., & Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(6918), 57.
- Ropo, O. I., Perez, M. S., Werner, N., & Enoch, T. I. (2017). Climate variability and heat stress index have increasing potential ill-health and environmental impacts in the East London, South Africa. *Int J Appl Eng Res*, 12(17), 6910-6918.
- Roy, L. A., Price, K., Pâquet, M., Vida, S., Sénécal, G., Lefebvre, L., & King, N. (2011). Canicule 2010 à Montréal. Rapport du directeur de santé publique. Montréal, QC: Direction de santé publique de l'Agence de la santé et des services sociaux de Montréal.
- Russo, S., Dosio, A., Graversen, R. G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M. B., ... & Vogt, J. V. (2014). Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(22), 12-500.
- Santé Canada. (2012). Heat Alert and Response Systems to Protect Health: Best Practices Guidebook. Disponible à : <http://www.winnipeg.ca/emergweb/pdfs/HeatAndSunSafety/HARSGuidebook.pdf>
- Schär, C., & Jendritzky, G. (2004). Climate change: Hot news from summer 2003. *Nature*, 432(7017), 559.

- Schnell, J. L., & Prather, M. J. (2017). Co-occurrence of extremes in surface ozone, particulate matter, and temperature over eastern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(11), 2854-2859.
- Séguin, J., & Berry, P. (2008). Santé et changements climatiques: évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada: rapport de synthèse. Santé Canada.
- Šeparović, L., Alexandru, A., Laprise, R., Martynov, A., Sushama, L., Winger, K., ... & Valin, M. (2013). Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian regional climate model. *Climate Dynamics*, 41(11-12), 3167-3201.
- Smargiassi, A., Goldberg, M. S., Plante, C., Fournier, M., Baudouin, Y., & Kosatsky, T. (2009). Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *Journal of Epidemiology & Community Health*, jech-2008.
- 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.
- Stefanon, M., D'Andrea, F., & Drobinski, P. (2012). Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014023.
- Stott, P. A., Jones, G. S., Christidis, N., Zwiers, F. W., Hegerl, G., & Shiogama, H. (2011). Single-step attribution of increasing frequencies of very warm regional temperatures to human influence. *Atmospheric Science Letters*, 12(2), 220-227.
- Stull, R. (2015) *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science and Meteorology for Scientists and Engineers*, 3rd Edition, Dept. of Earth, Ocean & Atmospheric Sciences, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 924 p.
- Van Vuuren, DP, Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., & Masui, T. (2011). Les voies de concentration représentatives: un aperçu. *Changement climatique*, 109 (1-2), 5.
- Vincent, L. A. (1998). A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series. *Journal of Climate*, 11(5), 1094- 1104.
- Vincent, L. A., & Gullet, D. W. (1999). Canadian historical and homogeneous temperature datasets for climate change analyses. *International Journal of Climatology*, 1999, vol. 19, no 12, p. 1375-1388.

- Vincent, L. A., Zhang, X., Bonsal, B. R., & Hogg, W. D. (2002). Homogenization of daily temperatures over Canada. *Journal of Climate*, *15*(11), 1322-1334.
- Vincent, L. A., Wang, X. L., Milewska, E. J., Wan, H., Yang, F., & Swail, V. (2012). A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *117*(D18).
- Von Storch, H., Zorita, E., & Cubasch, U. (1993). Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. *Journal of Climate*, *6*(6), 1161-1171.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, *416*(6879), 389.
- WCRP (2018) <http://www.cordex.org/about/our-vision/> consulté le 8 juin 2018
- WMO, W. (2015). Heat waves and health: guidance on warning-system development. *World Meteorological Organization and World Health Organization*. <http://www.who.int/globalchange/publications/heatwaves-health-guidance/en>. Accessed, 12.
- Yap, D., & Oke, T. R. (1974). Sensible heat fluxes over an urban area—Vancouver, BC. *Journal of Applied Meteorology*, *13*(8), 880-890.
- Yeh, K. S., Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., & Staniforth, A. (2002). The CMC-MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part III: Nonhydrostatic formulation. *Monthly Weather Review*, *130*(2), 339-356.
- Zacharias, S., Koppe, C., & Mücke, H. G. (2014). Influence of heat waves on ischemic heart diseases in Germany. *Climate*, *2*(3), 133-152.
- Zaitchik, B. F., Macalady, A. K., Bonneau, L. R., & Smith, R. B. (2006). Europe's 2003 heat wave: A satellite view of impacts and land-atmosphere feedbacks. *International Journal of Climatology*, *26*(6), 743-769