

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

POTENTIELS D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DE LA
COMMUNAUTÉ MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL. LE CAS DE LA
SIMULATION DE SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DES ÎLOTS DE CHALEUR À
L'HORIZON 2050.

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

EULALIE SENTENAC

JUILLET 2016

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.10-2015). 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

Pour m'avoir permis de me lancer dans cette grande aventure, je remercie mes parents et mes amis qui m'ont soutenu et supporté durant mes années de maîtrise. Bien que des milliers de kilomètres nous séparent, ils ont toujours été là pour moi.

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Jean-Philippe Waaub, professeur au département de géographie de l'Université du Québec à Montréal (UQÀM), membre du Groupe d'Études Interdisciplinaires en Géographie et Environnement Régional (GEIGER), membre du Groupe d'Études et de Recherche en Analyse des Décisions (GÉRAD), et codirecteur de l'équipe Énergie et environnement du GERAD (E2G), et membre de l'Institut des Sciences de l'Environnement (ISE). Ses conseils, ses orientations et sa présence m'ont été précieux tout au long du cheminement de mon travail, notamment face à mes doutes et à mes incertitudes.

Je remercie également mon codirecteur de recherche, Yves Baudouin, professeur au département de géographie de l'UQÀM, directeur du Collectif de recherche sur les Îlots de chaleur et directeur de l'Unité de programme des cycles supérieurs du département de géographie, pour ses avis et ses conseils, ainsi que ses connaissances et son savoir.

Je remercie Jean-Baptiste Plouhinec, chargé de cours à l'UQÀM et membre du Centre de recherche en géochimie isotopique, de m'avoir offert son aide et son appui dans le cadre de l'avancement de mon travail, autant pour la rédaction du mémoire que pour la mise en application et l'utilisation technique de la plateforme de modélisation Stella.

Je souhaite aussi remercier Serge Paquet pour toute l'aide qu'il m'a apportée au cours des analyses statistiques. Ce fut une phase très ardue pour moi.

Enfin, un grand remerciement à Caroline Larrivée, membre du groupe Impacts et Adaptation du Consortium Ouranos, de même que toutes les personnes-ressources et les professeurs avec qui j'ai pris contact et que j'ai rencontrés au cours de ces deux dernières années. Leur aide m'a été précieuse, en particulier lors de la collecte de données.

Un grand merci à toutes ces personnes. Je leur voue une profonde reconnaissance, car c'est grâce à elles que j'ai pu avancer et terminer ce mémoire de recherche.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------|
| LISTE DES FIGURES..... | VII |
| LISTE DES TABLEAUX..... | VIII |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES | IX |
| LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS..... | XI |
| RÉSUMÉ | XII |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE I | |
| ÉTAT DES CONNAISSANCES | |
| 1.1 Introduction..... | 12 |
| 1.2 Adaptation aux changements climatiques | 12 |
| 1.2.1 Définitions..... | 12 |
| 1.2.2 Niveaux d'interventions: exemples..... | 14 |
| 1.3 Les plans d'adaptation aux changements climatiques à l'échelle urbaine | 20 |
| 1.3.1 Éléments constitutifs des plans d'adaptation | 20 |
| 1.3.2 Démarche d'élaboration et outils | 22 |
| 1.3.3 Place des îlots de chaleur urbains dans les plans d'adaptation aux changements climatiques à l'échelle urbaine | 28 |
| 1.4 Les îlots de chaleur urbains | 30 |
| 1.4.1 Définitions et liens avec les changements climatiques | 30 |
| 1.4.2 Outils d'identification, de mesure et de suivi des ICU | 34 |
| 1.4.3 Impacts des îlots de chaleur urbains sur la santé humaine..... | 35 |
| 1.4.4 Mesure de lutte contre les îlots de chaleur urbains | 37 |
| CHAPITRE II | |
| MÉTHODOLOGIE..... | 40 |
| 2.1 Introduction..... | 40 |

| | | |
|----------------------|---|----|
| 2.2 | Démarche méthodologique | 40 |
| 2.2.1 | Approche globale | 40 |
| 2.2.2 | Étude de cas de la CMM: description du territoire de l'étude | 42 |
| 2.3 | Atteinte du premier objectif secondaire : critères et indicateurs | 45 |
| 2.3.1 | Collecte des données: analyse de la littérature sur les plans d'ACC | 45 |
| 2.3.2 | Représentation du processus de formation et d'amplification des ICU ... | 48 |
| 2.4 | Atteinte du deuxième objectif secondaire: illustration de l'apport de la modélisation pour réduire les ICU sur le territoire de la CMM à l'horizon 2050..... | 49 |
| 2.4.1 | Choix d'une approche de modélisation: simulation avec la plateforme Stella | 49 |
| 2.4.2 | Validation des conditions d'utilisation du modèle..... | 51 |
| 2.4.3 | Conception des scénarios d'aménagement à l'horizon 2050 | 56 |
| 2.4.4 | Simulation des scénarios d'aménagement à l'horizon 2050 | 57 |
| CHAPITRE III | | |
| RÉSULTATS ET ANALYSE | | |
| 3.1 | Introduction..... | 61 |
| 3.2 | Analyse de la littérature sur les plans d'ACC et proposition d'un schéma conceptuel simplifié de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU | 61 |
| 3.2.1 | Analyse de la littérature sur les plans d'ACC | 61 |
| 3.2.2 | Proposition d'un schéma conceptuel simplifié de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU | 65 |
| 3.3 | Validation des conditions d'utilisation du modèle et révision du schéma conceptuel de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU | 66 |
| 3.3.1 | Tests de validation des conditions d'utilisation du modèle..... | 66 |
| 3.3.2 | Révision de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU: modèle simplifié..... | 67 |
| 3.4 | Simulation des scénarios d'aménagement à l'horizon 2050..... | 69 |
| 3.4.1 | Le scénario de base BAU | 69 |
| 3.4.2 | Le scénario 2: augmentation de 10% du NDVI | 70 |

| | |
|---|----|
| 3.4.3 Le scénario 3: diminution de 5% du NDBI..... | 71 |
| 3.4.4 Le scénario 4: hausse de 10% de NDVI et baisse de 5% de NDBI | 71 |
| 3.4.5 Comparaison des scénarios à HS N..... | 71 |
| 3.4.6 Comparaison entre scénarios..... | 72 |
| 3.4.7 Conclusion..... | 73 |
| CHAPITRE IV | |
| DISCUSSION | 74 |
| 4.1 Évaluation des impacts des ICU pour les plans d'ACC | 74 |
| 4.2 Prospective pour l'ACC: résultats du modèle de simulation pour la réduction des ICU sur le territoire de la CMM..... | 75 |
| CONCLUSION | 78 |
| ANNEXE A | |
| LA BASE DE DONNÉES | 81 |
| ANNEXE B | |
| LA PLANIFICATION: DÉFINITIONS ET CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES..... | 84 |
| ANNEXE C | |
| L'ANALYSE STATISTIQUE PRÉLIMINAIRE..... | 91 |
| BIBLIOGRAPHIE | 97 |

LISTE DES FIGURES

| Figure | Page |
|---|------|
| 1.1 Effet d'un îlot de chaleur urbain: comparaison entre la zone rurale et la ville | 31 |
| 1.2 Illustrations des conditions favorisant les îlots de chaleur (à gauche) et les îlots de rafraîchissement (à droite) | 39 |
| 1.3 Schéma du cycle d'évaporation et d'évapotranspiration des plantes | 39 |
| 2.1 Démarche méthodologique | 41 |
| 2.2 Carte générale du territoire de la CMM..... | 45 |
| 2.3 Schématisation de la dynamique des systèmes: relations entre les boucles de rétroaction, les flux et les réservoirs | 50 |
| 2.4 Graphique illustrant une boucle de rétroaction positive ou explosive: comportement divergent croissant..... | 51 |
| 2.5 Schéma de modélisation et représentation graphique d'une boucle de rétroaction négative ou régulatrice: comportement convergent vers un but.. | 51 |
| 2.6 Images satellitaires de Google Earth: localisation des stations d'observations (punaises jaunes) dans et hors du territoire de la CMM et sa délimitation..... | 58 |
| 3.1 Schéma conceptuel simplifié de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU | 66 |
| 3.2 Représentation du modèle simplifié de simulation Stella..... | 69 |
| B.1 Schéma représentant le processus de gestion..... | 85 |
| C.1 Évolution de la température moyenne quotidienne de la CMM et de sa zone extérieure (°C) durant les mois de juin à août 2011 – Plateforme Stella..... | 92 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau | Page |
|---------|--|
| 1.1 | Types d'adaptation et leurs définitions 14 |
| 1.2 | Quelques plans locaux d'ACC..... 17 |
| 1.3 | Quelques plans d'ACC au Québec 19 |
| 1.4 | Principes fondamentaux d'un plan d'adaptation..... 21 |
| 2.1 | Structuration des impacts par enjeu selon la démarche d'ÉIE: enjeu de santé publique 46 |
| 2.2 | Compilation des types de données à récolter 52 |
| 2.3 | Répertoire des stations d'observation caractérisant les secteurs à l'étude..... 59 |
| 3.1 | Critères et indicateurs d'évaluation des impacts des îlots de chaleur urbains: composante environnementale..... 62 |
| 3.2 | Critères et indicateurs d'évaluation des impacts des îlots de chaleur urbains: composante économique..... 63 |
| 3.3 | Critères et indicateurs d'évaluation des impacts des îlots de chaleur urbains: composante territoriale..... 64 |
| 3.4 | Critères et indicateurs d'évaluation des impacts des îlots de chaleur urbains: composante sociale 65 |
| A.1 | Extrait de la table de données des températures moyennes par secteur..... 81 |
| A.2 | Extrait de la table de données des municipalités 83 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|-------|--|
| ACC | Adaptation aux changements climatiques |
| ACP | Analyse de composantes principales |
| BAU | <i>Business as usual</i> (scénario de base) |
| CMM | Communauté métropolitaine de Montréal |
| COP | <i>Conference of the parties</i> (conférence des parties) |
| ÉES | Évaluation Environnementale Stratégique |
| GES | Gaz à effet de serre |
| GIEC | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| HS N | Hors secteur nord - Température moyenne de la zone extérieure nord |
| HS S | Hors secteur sud – Température moyenne de la zone extérieure sud |
| ICU | Îlots de chaleur urbains |
| INSPQ | Institut National de la Santé Publique du Québec |
| IPCC | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| IQA | Indice de la Qualité de l'Air |
| JMP | John's Macintosh Projet |
| ONERC | Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique |
| ONU | Organisation des Nations-Unies ou Nations-Unies (version abrégée) |

| | |
|----------|--|
| NCEH | <i>National Center for Environmental Health</i> (Centre national pour la santé environnementale) |
| NDBI | <i>Normalized Difference Build-up Index</i> (indice de bâti par différence normalisée) |
| NDVI | <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (indice de végétation par différence normalisée) |
| PMAD | Plan Métropolitain d'Aménagement et de Développement |
| S1 | Température moyenne du secteur 1 – Agglomération de Laval |
| S2 | Température moyenne du secteur 2 – Agglomération de Longueuil |
| S3 | Température moyenne du secteur 3 – Agglomération de Montréal |
| S4 | Température moyenne du secteur 4 – Couronne Nord |
| S5 | Température moyenne du secteur 5 – Couronne Sud |
| Temp moy | Température moyenne de la Communauté métropolitaine de Montréal |
| UE | Union Européenne |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS

| | |
|--------------------|--|
| $^{\circ}\text{C}$ | Degré celsius |
| ΔT | Différence de températures |
| CO_2 | Formule chimique du dioxyde de carbone |
| km | Kilomètre |
| km^2 | Kilomètre carré |
| m | Mètre |
| b_0 | Ordonnée à l'origine |
| b_1 | Coefficient de régression ou directeur (pente) |
| y_i | Valeur estimée de y |

RÉSUMÉ

Ce projet de recherche, de nature exploratoire, a pour objectif de contribuer à l'élaboration de plans d'adaptation des villes aux changements climatiques. Il est centré sur l'étude de cas de la Communauté métropolitaine de Montréal. Il contribue à la réflexion sur un modèle de planification prenant en compte l'adaptation aux changements climatiques à l'échelle urbaine. La démarche de modélisation est illustrée par le phénomène des îlots de chaleur urbains, problème actuel en interaction avec les changements climatiques qui est habituellement traité dans les plans urbains d'adaptation aux changements climatiques. Dans une première partie, la revue de la littérature permet de faire le portrait général de l'adaptation aux changements climatiques. Elle débouche sur l'approche méthodologique et la collecte des données. Dans une deuxième partie, une analyse statistique liée à la modélisation de scénarios d'aménagement est effectuée via la plateforme John's Macintosh Project (JMP). Elle sert à valider les données recueillies et à calibrer le modèle de simulation du phénomène des îlots de chaleur urbains sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal. Dans une dernière partie, un modèle de simulation mettant en œuvre un nombre restreint de variables est construit à l'aide du logiciel Stella afin d'illustrer la pertinence d'un tel outil pour évaluer quatre scénarios potentiels d'aménagement couvrant une période de 40 ans (2011 à 2050). Par comparaison, les résultats de l'étude ont confirmé une interaction entre le taux de végétation, le taux de minéralisation du bâti et la température moyenne de l'air de la Communauté métropolitaine de Montréal. Ce mémoire de recherche, en se concentrant sur les principaux facteurs liés au phénomène des îlots de chaleur urbains, constitue un bon projet pilote et ouvre la porte à des développements ultérieurs reliés à la constitution d'un modèle plus complet dans le cadre d'un travail d'équipe.

Mots-clés: plan, adaptation aux changements climatiques, phénomène des îlots de chaleur urbains, modèle de simulation, Communauté métropolitaine de Montréal.

INTRODUCTION

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2014a) définit les changements climatiques¹ comme des modifications du climat statistiquement identifiées par des variations de la valeur moyenne et/ou de la variabilité de certaines propriétés climatiques, conduisant à des événements naturels plus fréquents et plus persistants. Ces modifications sont provoquées par des processus naturels internes ou par des événements externes comme par exemple des modulations du cycle solaire, des éruptions volcaniques et des changements anthropogéniques persistants dans la composition atmosphérique ou dans l'utilisation du territoire. Depuis la révolution industrielle, les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux activités humaines constituent la principale cause des changements climatiques, observable à l'échelle mondiale (GIEC, 2007, 2013; Gouvernement du Canada, 2013). Ces changements se caractérisent, entre autres, par une modification dans le régime des précipitations, une hausse de la température et du niveau de la mer, etc. (GIEC, 2007; Gouvernement du Canada, 2013; IPCC, 2014a; Warren et Lemmen, 2014). Ces phénomènes naturels entraînent des dégâts et des dommages collatéraux importants aux communautés urbaines et naturelles (Picketts, 2010; Ecologic Institute *et al.*, 2013; IPCC, 2014a, 2014b). De plus, dès 2007, le GIEC (2007) avait déjà effectué des scénarios prévisionnels afin d'évaluer l'évolution du taux des émissions de GES d'ici 2030. L'énergie la plus utilisée étant celle provenant des combustibles fossiles, ces émissions augmenteraient de 90% d'ici 2030, comparés aux émissions de 1990. De fait, les changements climatiques sont inévitables et sans

¹ La littérature fait part de la singularité ou de la pluralité de l'expression « changement climatique ». Ici, nous employons sa pluralité en raison du contexte: planification et adaptation.

équivoque, et leurs effets sont aujourd'hui reconnus par la communauté scientifique (GIEC, 2007; Baynham, 2011; ONERC, 2012).

Les villes sont des systèmes complexes et dynamiques où se concentrent plus de 50% de la population mondiale, ainsi que la plupart des infrastructures et des activités socio-économiques et politiques (Ecologic Institute *et al.*, 2013; IPCC, 2014a). Entre 1950 et 2011, cette population urbaine a augmenté de 2,85 milliards d'habitants (GIEC, 2007). En 2012, les Nations-Unies prévoyaient que 70% de la population mondiale vivrait en zone urbaine en 2050 (ONU, 2012). Les villes doivent donc relever le défi, non seulement de la croissance démographique mais aussi celui des changements climatiques (ex.: inondations, canicules, vagues de chaleur) (Marchadier, 2013; IPCC, 2014a). En effet, elles sont et seront directement affectées par les impacts négatifs des changements climatiques, en raison de leur vulnérabilité et de leur dépendance aux moyens techniques et technologiques (Ecologic Institute *et al.*, 2013; IPCC, 2014a). Ces impacts se traduisent par des problèmes de santé et des décès liés à la hausse de la température ou à la pollution atmosphérique, des dégâts matériels causés par les phénomènes météorologiques extrêmes ou par une détérioration de la qualité de l'eau (Phalatse et Mbara, 2009; Warren et Lemmen, 2014). Cette urbanisation rapide a conduit à la convergence de communautés fortement vulnérables dans des zones à risque élevé aux phénomènes météorologiques extrêmes. Ce fait est particulièrement vrai pour les ménages à faible et moyen revenu (IPCC, 2014a). Ainsi, les changements climatiques aggraveront les problèmes actuels des villes et en engendreront d'autres (Ecologic Institute *et al.*, 2013; IPCC, 2014a). De surcroît, les villes actuelles sont confrontées à un autre phénomène, aussi lié aux changements climatiques: les îlots de chaleur urbains (ICU) (IAU ÎdF, 2010a, 2010b). Ceux-ci se manifestent de manière locale, sous l'influence de la taille, de la géométrie, de la morphologie et des activités anthropiques des villes (IAU ÎdF, 2010a; BNQ, 2013; Marchadier, 2013). Dans cette étude, nous focaliserons sur le phénomène des ICU.

Au Canada, les changements climatiques sont aussi documentés, variant d'une région à l'autre (Warren et Lemmen, 2014). Ils sont plus marqués au nord et à l'ouest du territoire canadien, mais moins le long de la côte Atlantique (Warren et Lemmen, 2014). Vincent *et al.* (2012) rapportent d'ailleurs que de 1950 à 2000, la température moyenne de l'air à la surface terrestre a augmenté de 1,5°C. Environnement Canada (2013) estime également que l'année 2010 a été la plus chaude, jamais enregistrée au niveau national. La température de l'air y a été supérieure de 3°C par rapport à la température normale de référence de la période de 1961 à 1990. De même, les années 2011 et 2012 ont connu des hausses de 1,5°C et 1,9°C respectivement, qui sont supérieures à la moyenne enregistrée entre 1961 et 1990 (Warren et Lemmen, 2014). Par ailleurs, les variations climatiques sont fonction des saisons. Selon l'étude de Vincent *et al.* (2012), de 1950 à 2010, elles forment un cycle de réchauffement sur l'ensemble du Canada. D'une part, les plus importantes hausses de température ont été observées pendant l'hiver et le printemps, dans les régions du nord et de l'ouest. D'autre part, elles se manifestent durant la période estivale, dans les régions du sud. Des événements tels que la diminution de la chute de neige et l'augmentation des précipitations sont caractéristiques de ces régions et concordent avec la hausse des températures. De plus, « Les émissions anthropiques de GES constituent la principale cause du réchauffement à long terme au Canada (et dans le reste du monde) depuis le milieu du XX^{ème} siècle. D'autres facteurs peuvent avoir une forte incidence sur la variabilité à court terme du climat imposée à une tendance à long terme » (Warren et Lemmen, 2014, p. 56). De ce fait, ces phénomènes observés risquent de créer des problèmes au sein des villes canadiennes dans divers secteurs tels que celui des transports, notamment en termes d'aménagement et de structure du réseau, celui des ressources en eau en termes d'accessibilité et d'utilisation, ainsi que celui de la santé publique (Lemmen *et al.*, 2004).

À l'échelle du Québec, le Consortium Ouranos a aussi effectué des scénarios de prévisions climatiques pour l'an 2050, indiquant une augmentation des températures et un changement dans le régime des précipitations selon les saisons et les régions (Ouranos, 2010; Warren et Lemmen, 2014). En effet, certaines régions québécoises sont plus vulnérables que d'autres et seront davantage affectées par des événements climatiques extrêmes tels que présentés ci-dessus (Ouranos, 2010). Ces derniers auront un effet négatif ou positif sur l'accumulation de neige au sol, la température et la durée de la saison froide (Desjarlais *et al.*, 2010). Ces phénomènes affecteront également les bâtiments et les infrastructures en zones urbaines, mais aussi les secteurs agricoles, la demande en énergie, le secteur du transport, la santé publique, les activités récréotouristiques, les écosystèmes et la biodiversité ainsi que les ressources en eau (Desjarlais *et al.*, 2004; Desjarlais *et al.*, 2010; Ouranos, 2010). De plus, les changements du climat québécois ont été observés au cours du XX^{ème} siècle révélant par exemple que, dans les régions du sud, il y a eu une hausse du nombre de jours chauds et de nuits chaudes, associée à une diminution du nombre de jours de gel et de nuits froides. Tandis que dans les régions du nord, depuis le milieu des années 1990, le climat se réchauffe plus rapidement, passant soudainement d'une période de léger refroidissement à une plus chaude (Ouranos, 2010). D'autres phénomènes naturels sont liés au réchauffement du climat québécois tels qu'un raccourcissement de la durée de la saison de gel et une augmentation du nombre de degrés-jours de croissance (Ouranos, 2010).

Au vu de l'ampleur des impacts négatifs des changements climatiques, des mesures d'atténuation de ces impacts sont prises dès le début des années 1990 afin de réduire les émissions de GES (Environnement Canada, 2012; Ecologic Institute *et al.*, 2013). Par exemple, ces mesures sont la réduction des subventions visant l'approvisionnement énergétique par les combustibles fossiles, l'investissement dans des installations pratiques de transport en commun et dans les modes de déplacement non motorisés, ou la création de programmes de gestion de la demande dans le

secteur du bâtiment (GIEC, 2007). Aujourd'hui, non seulement l'atténuation, mais aussi l'adaptation aux changements climatiques (ACC) sont nécessaires et prioritaires (Baynham, 2011; IPCC, 2014a). Selon l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC, 2012), l'ACC assurerait la mobilisation de tous les acteurs et serait complémentaire à l'atténuation. Toutefois, l'atténuation et l'adaptation sont aussi applicables de manière indépendante l'une de l'autre (CCE, 2009; Lemmen *et al.*, 2008; Locatelli, 2010). Quant à l'ACC, elle favorise la réduction de la vulnérabilité des populations, ainsi que des systèmes urbains et naturels face aux impacts négatifs des changements climatiques. L'adaptation induit également des modifications comportementales, aussi bien des individus que des éléments du système, qui se manifestent par l'instauration de directives et de mesures adéquates (Mansanet-Batallet, 2010). D'après Lemmen *et al.* (2008), elle aurait trois objectifs à atteindre:

- 1) atténuer les impacts actuels;
- 2) réduire la sensibilité et l'exposition aux dangers du climat;
- 3) accroître la résistance aux facteurs de stress climatique ou non climatique afin d'améliorer la capacité d'adaptation.

Éventuellement, l'ACC offre aussi la possibilité de tirer profit de leurs impacts positifs² (ex.: améliorer la résilience des infrastructures) (IPCC, 2014a) et d'ouvrir sur de nouvelles possibilités (Francke, 2008; Simonet, 2011). À titre d'exemple, prenons le cas de la ville de Kristianstad en Suède (Francke, 2008). Face aux changements climatiques, cette ville se voit confrontée à des inondations plus fréquentes, dont l'amplitude risque de devenir deux fois plus importante suite à la hausse du niveau des eaux. En effet, plus le niveau marin sera élevé, plus l'évacuation de l'eau sera difficile. Les villes doivent donc choisir entre vivre avec cette eau ou

² Notons que « [...] les impacts positifs (bénéfiques) peuvent ne pas être compris: [...] comme il faudra s'adapter pour réduire au minimum les impacts négatifs, il faudra également le faire pour tirer avantage efficacement des possibilités que le changement climatique pourrait présenter [...] » (Lemmen *et al.*, 2008, p. 232).

ériger une barrière entre elles et la mer. Cette dernière solution étant assez risquée, il est préférable de s'adapter et de vivre avec l'eau afin d'éviter de créer des systèmes vulnérables qui pourraient alors entraîner des catastrophes si les digues cédaient. Aussi, pour pallier ces phénomènes, trois approches ont été appliquées. La première approche consiste à prendre avantage des infrastructures existantes, soit en installant des promenades et des pistes cyclables au sommet des digues. Ces dernières sont ainsi devenues des lieux de plaisance où la population vient se détendre, lire ou encore se promener. La deuxième approche correspond à la construction de nouveaux barrages qui seraient résistants aux inondations liées aux changements climatiques, pour au moins les cent prochaines années. De plus, le rapport de Francke (2008) précise qu'un système de stockage de l'eau a aussi été prévu, dans le cas où le pire scénario se produirait. Enfin, la troisième approche est la construction de maisons sur pilotis. Cet auteur considère ici une éventuelle possibilité d'une vie au-dessus des eaux. Dans la ville de Kristianstad, un projet similaire a déjà été réalisé. En effet, un nouveau musée a été construit sur pilotis dans le but d'inciter les visiteurs à penser à un éventuel mode de vie au milieu des eaux. Les habitants de Kristiansad choisissent de vivre avec l'eau et non de la contrer, d'essayer de l'empêcher d'entrer dans la ville de Mårtensson (Francke, 2008).

De surcroît, les communautés au sein des systèmes urbains et naturels auront de plus en plus de difficultés à faire face aux impacts négatifs des changements climatiques, si une politique ou une intervention réglementaire n'est pas mise en place (GIEC, 2007). C'est pourquoi, depuis quelques décennies, plusieurs villes intègrent l'ACC dans les agendas politiques, notamment dans la planification à long terme de l'aménagement du territoire. Elles développent et procèdent à la création et à l'application de plans d'action, de stratégies et de programmes d'adaptation aux changements climatiques (Baynham, 2011; Ecologic Institute *et al.*, 2013, IPCC, 2014a). Ils abordent des thèmes comme les phénomènes climatiques extrêmes, l'environnement bâti, les écosystèmes et la biodiversité ou la chaleur accablante et le phénomène des ICU. Ces derniers correspondent à des secteurs urbains où les

températures estivales sont plus élevées que celles de l'environnement immédiat. Ces secteurs sont caractérisés par des différences de température qui varient de 5 à 10°C (Baudouin et Cavayas, 2008). En matière d'ACC, la Ville de Laval a, par exemple, pris l'initiative de planter plus de 1 575 arbres et arbustes afin de réduire les effets négatifs des ICU et d'améliorer la qualité de l'air. Cette action entraîne aussi une meilleure qualité de vie aux habitants et l'embellissement de la ville (Ouranos, 2010). D'ailleurs, il a été scientifiquement prouvé que les initiatives d'ACC des villes sont effectives et essentielles afin de réduire les risques aux changements climatiques et la vulnérabilité³ des systèmes naturels et humains (IPCC, 2014a).

Cependant, l'ACC n'en est qu'à ses prémises. Les villes font face à des difficultés conceptuelles dans le cadre de sa planification et de sa mise en place (Gillet, 2009). Carmin, Dodman et Chu (2013) font également état de l'absence de modèles de plans d'action valides applicables par toutes les villes. Par ailleurs, lors des concertations et des réunions des communautés urbaines, le manque d'informations sur les aspects sociaux liés à l'adaptation freinent la prise de décisions concernant l'élaboration des plans urbains d'ACC (Simonet, 2011; Carmin, Dodman et Chu, 2013). Les villes sont aussi confrontées à d'importantes contraintes pour augmenter et allouer les ressources d'adaptation telles qu'un manque de subventions et de financement, de ressources humaines et/ou de mandats (IPCC, 2014a). L'adaptation est nécessaire et doit donc être davantage développée, de sorte qu'elle puisse être applicable à l'ensemble des villes (Smit et Wandel, 2006; GIEC, 2007; Gillet, 2009).

Au Canada, des mesures d'ACC ont été mises en place dans plusieurs secteurs comme ceux des ressources naturelles ou de la santé humaine. Présentes aux échelles nationale, régionale et locale, leur implantation se fait en tenant compte des facteurs

³ La vulnérabilité d'une région est caractérisée par sa sensibilité et sa capacité d'adaptation aux changements climatiques (Simonet, 2011; ONERC, 2012). Elle est liée à la résilience des communautés urbaines (IPCC, 2014a).

de vulnérabilité des systèmes naturels et humains, ainsi que des impacts négatifs des changements climatiques (Warren et Lemmen, 2014). Par exemple, dans le but de réduire la consommation en électricité future, des programmes et des normes réglementaires ont été créés afin d'améliorer l'efficacité énergétique dans les immeubles, des appareils et des équipements (IPCC, 2014a). De plus, des évaluations et des recherches ciblées sur la santé humaine sont aussi réalisées. Elles sont accompagnées d'une sensibilisation de la population aux moyens d'atténuation des risques sanitaires liés au climat (Warren et Lemmen, 2014). Cependant, ces initiatives ne sont pas uniformes sur le territoire canadien. D'une part, certaines zones et communautés sont plus à risques et plus vulnérables que d'autres. D'autre part, l'acquisition des connaissances en matière d'adaptation est variable d'un enjeu à l'autre, et d'une région à l'autre (Warren et Lemmen, 2014).

Au Québec, l'ACC s'inscrit essentiellement au sein d'autres projets de plans d'action et de stratégies tels que le développement durable, la santé publique, les îlots de chaleur urbains, etc. (Fernandez et Deshaies, 2011; FAQDD, 2012; Larrivée, 2013). Les recherches sont majoritairement axées sur les effets biophysiques des changements climatiques et leur ampleur (Lemmen *et al.*, 2004). Néanmoins, ces dernières années, le gouvernement québécois et d'autres institutions (ex.: Institut national de la santé publique du Québec) se sont penchés sur la question de la planification afin d'améliorer la capacité d'adaptation des villes et d'approfondir les connaissances en matière de vulnérabilité (Lemmen *et al.*, 2004; Bélanger *et al.*, 2007; Ouranos, 2010). Ils estiment également que les recherches doivent se poursuivre dans certains domaines relatifs à l'ACC, notamment les suivants (MAMM, 2001; Lemmen *et al.*, 2004; Corfee-Morlot *et al.*, 2009):

- l'identification et la compréhension des éléments nuisant à la mise en place de mesures d'ACC;
- une meilleure compréhension de la multi-gouvernance ou gouvernance à plusieurs échelles (états, municipalités, territoires,...) et de la prise de décision

au niveau politique, et des propositions concernant le bon moyen de les renforcer;

- une compréhension approfondie des facteurs influençant les décisions liées aux mesures d'ACC;
- la réalisation d'études sur la façon d'intégrer les changements climatiques aux cadres de gestion du risque en place et à la planification territoriale à long terme.

Ces deux derniers domaines font d'ailleurs l'objet de cette recherche.

Au niveau métropolitain, le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) a connu plusieurs changements au cours des dernières décennies. Ainsi, par exemple, sa population totale est passée de 3,4 millions d'habitants en 2000 (MAMM, 2001) à 3,8 millions d'habitants en 2014 (CMM, 2014a, 2015b). Sur le plan économique, le produit intérieur brut de la CMM évolue également de façon importante: 82 milliards de dollars en 2000 (MAMM, 2001) et 193 milliards de dollars en 2013 (CMM, 2015b). De surcroît, le développement de la CMM passe par sa capacité à s'adapter aux changements climatiques et par la nécessité de planifier efficacement l'aménagement de son territoire (MAMM, 2001; MAMR, 2005; MAMR, 2007; CMM, 2012b). Tel que rapporté dans le projet de plan métropolitain d'aménagement et de développement (PMAD), la CMM se doit de déterminer comment aménager le territoire en tenant compte de la croissance de la population projetée afin de faire face aux transformations sociodémographiques (ex.: création d'emplois d'ici 2031) (CMM, 2012b; CMM, 2014a). Dans le cadre de cette étude, la CMM qui regroupe 82 municipalités, est divisée en cinq secteurs géographiques, soit les agglomérations de Montréal, de Longueuil et de Laval, et les Couronnes Nord et Sud (CMM, 2010b, 2012a, 2015a). Cette représentation en cinq secteurs s'est imposée d'elle-même, considérant la disponibilité des données et les exigences du modèle.

De nature exploratoire, ce mémoire contribue aux connaissances nécessaires pour élaborer un plan d'ACC à l'échelle d'une communauté urbaine, dans le cadre de la planification à long terme de l'aménagement du territoire. Par la construction de scénarios d'évolutions potentielles de l'utilisation du sol (scénarios d'aménagement), il fournira une base documentaire pour assurer et améliorer la capacité d'adaptation des villes, et réduire leur vulnérabilité face aux changements climatiques. Parmi les divers problèmes qui doivent être abordés dans un plan d'ACC, l'effort est mis sur la question des ICU au Québec, plus précisément sur le territoire de la CMM.

L'objectif général de ce mémoire est de contribuer à l'élaboration d'un plan d'ACC de la CMM, en proposant des outils de modélisation afin d'évaluer les impacts de scénarios d'aménagement à l'horizon 2050. Les changements climatiques occasionnent de nombreuses modifications des conditions de vie en milieu urbain. Ces modifications peuvent être évaluées en relation avec divers enjeux. Parmi eux, le mémoire s'intéresse à la réduction des impacts sur la santé publique, causés par les ICU sur le territoire de la CMM.

Les deux objectifs secondaires du mémoire sont les suivants:

- déterminer les critères et les indicateurs à prendre en compte pour réduire les ICU et leurs impacts sur la santé publique sur le territoire de la CMM;
- illustrer l'apport de la modélisation pour établir des stratégies de réduction des ICU et par voie de conséquence, de leurs impacts sur la santé publique, tel qu'établis par la littérature, lors de l'évaluation de scénarios d'aménagement à l'horizon 2050.

Pour répondre au premier objectif secondaire, nous nous appuierons sur une revue de la littérature. Présentés dans quatre tableaux, les critères et les indicateurs d'évaluation des impacts des ICU seront répertoriés selon les composantes suivantes du développement durable: économie, environnement, social et territoire. Aux fins de notre exercice de simulation, des scénarios d'aménagement seront construits à l'horizon 2050 sur une période de 40 ans (2011-2050). Un modèle de simulation des

impacts des scénarios sera conçu. Les données permettant de mesurer les critères et les indicateurs d'évaluation des scénarios d'aménagement seront collectées. Leur analyse statistique assurera la calibration du modèle. Ensuite, pour répondre au deuxième objectif secondaire, la modélisation servira à évaluer les scénarios d'aménagement en regard de la réduction des ICU et leurs impacts sur la santé publique sur le territoire de la CMM.

Outre cette introduction, le mémoire comporte quatre chapitres:

- Chapitre I – État des connaissances;
- Chapitre II – Méthodologie;
- Chapitre III – Présentation des résultats;
- Chapitre IV – Analyse et discussion des résultats.

Il est finalisé par une conclusion.

CHAPITRE I

ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.1 Introduction

Ce chapitre est divisé en trois parties. La première porte sur les définitions et les niveaux d'intervention d'ACC. La deuxième est axée sur les plans d'ACC des villes; soit leurs éléments constitutifs, leur démarche d'élaboration et les outils nécessaires, et la place des ICU dans ces plans d'adaptation. La dernière met l'accent sur le phénomène des ICU, en particulier sur leurs définitions et leur lien avec les changements climatiques, sur les outils d'identification, de mesure et de suivi, ainsi que sur leurs impacts et les mesures de lutte contre les ICU.

1.2 Adaptation aux changements climatiques

1.2.1 Définitions

Au fil des années, le terme « adaptation » s'est vu conféré un grand nombre de définitions, se différenciant selon la discipline (sociologie, anthropologie, biologie, psychologie, géographie) et les auteurs consultés. En matière de changements climatiques, l'adaptation est un concept relativement récent dont l'intérêt va en grandissant (Simonet, 2011). En effet, au niveau international, l'ACC est au cœur des discussions dès 1995, lors de la première conférence des parties (*Conference of the parties*, COP1) à Berlin, organisée par la Convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques. Les parties s'entendent pour dire que des politiques et des mesures d'adaptation doivent être mises en place. Pourtant, l'ACC n'est considérée

comme prioritaire que bien plus tard, lors de la publication du quatrième rapport du GIEC et de la Feuille de route de Bali (COP13) en 2007 (Drouet, 2009; Williams, 2009). « L'adaptation est une partie importante des négociations visant à renforcer la réponse au changement climatique jusqu'en 2012 et au-delà sous les auspices du AWG-LCA » (Williams, 2009, p. 8). Malgré ces démarches internationales, l'ACC a fait peu de progrès, autant en matière de connaissances que de pratiques tels que des modèles de plan d'action, de planification et de mise en œuvre (Lemmen *et al.*, 2004; Gillet, 2009; Simonet, 2011).

La majorité des chercheurs s'entend sur la définition de ce concept, formulée par le GIEC (Smit et Wandel, 2006; Mansanet-Batallet, 2010). Ce dernier explique que l'adaptation est une façon de réduire ou d'éviter les risques liés aux changements climatiques ou d'en exploiter les bénéfiques dans les systèmes humains. Dans les systèmes naturels, l'ajustement aux effets futurs des changements climatiques peut se faire par l'intervention humaine (IPCC, 2014a). Différents types d'adaptation, à caractère public ou privé, existent aussi (Tableau 1.1) (Simonet, 2011; ONERC, 2012; Alcaras et Lacroux, 2013; Centre de ressources PCET, 2013).

Tableau 1.1 Types d'adaptation et leurs définitions

| Types d'adaptation | Définitions |
|----------------------------|--|
| Anticipatrice ou proactive | Mesures d'adaptation prises avant l'observation d'impacts induits par les changements climatiques. |
| Réactive | Mesures d'adaptation prises après l'apparition des impacts induits par les changements climatiques. |
| Spontanée ou autonome | Adaptation à une contrainte climatique par une réponse immédiate et non réfléchie d'un point de vue stratégique. |
| Planifiée | Anticipation du risque pour une stratégie d'adaptation globale et efficace à long terme. |

À partir de la littérature, Simonet (2011) identifie trois limites à l'ACC qui, d'après lui, ralentissent sa mise en œuvre par des mesures efficaces:

- la difficulté de définir l'ACC: concept récent, elle connaît trop de définitions;
- son application est restreinte par un manque de ressources, de volonté politique ou de compétences selon les pays;
- l'état des conditions sociales, économiques, institutionnelles et technologiques caractérisant la capacité adaptative d'un système facilite ou contraint l'efficacité des mesures adaptatives.

1.2.2 Niveaux d'interventions: exemples

1.2.2.1 Exemple de l'Europe

En ratifiant le Protocole de Kyoto en 1998, l'Union Européenne (UE) s'est engagée à réduire les émissions de GES de 8% par rapport à leur niveau en 1990 (DILA, 2008a, 2008b). Sa volonté de faire davantage d'efforts en matière de changement climatique, se traduit par la publication du livre vert par la Commission européenne en juillet

2007. Ce livre porte sur des questions d'ACC afin de définir une démarche adéquate (Ecologic Institute *et al.*, 2013). Ensuite, en 2008, l'UE prend l'initiative de mettre en place des directives et des actions concrètes au travers du document « Paquet Énergie Climat » (DILA, 2008a, 2008b). Celles-ci sont dirigées vers « la limitation des émissions de CO₂ par les véhicules de transport, le développement de la capture et du stockage du CO₂, la répartition des efforts de réduction des gaz à effet de serre entre les États membres, la réforme du marché européen des quotas d'émissions de CO₂ et les énergies renouvelables », et cela d'ici 2020 (DILA, 2008a). En 2009, le livre blanc est publié et réfère aux effets des changements climatiques et aux mesures d'ACC envisageables, et à la façon de l'intégrer dans les politiques publiques actuelles. Par ce livre, la Commission européenne propose l'élaboration d'une stratégie communautaire complète d'ACC pour 2013 (CCE, 2009; ONERC, 2012; Ecologic Institute *et al.*, 2013).

À l'échelle nationale, la France est le premier pays européen à commencer à agir en matière de planification de l'adaptation; viennent ensuite l'Allemagne suivie de la Finlande et de l'Espagne et enfin, le Royaume-Uni (Biesbroek *et al.*, 2010; ONERC, 2012). Ainsi, en France, est adoptée la *Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique*, puis en Espagne, le *Plan de national de adaptación al cambio climático* ou encore au Royaume-Uni, *Adapting to climate change in England. A framework for action* (Biesbroek *et al.*, 2010). Ces stratégies font ressortir les projections des impacts liés aux changements climatiques au niveau national et évaluent les vulnérabilités des régions et/ou des secteurs afin de mettre en place des mesures d'adaptation adéquates (Biesbroek *et al.*, 2010).

En Europe, les stratégies et les mesures adoptées au niveau local (région, secteur, municipalité) dépendent de l'engagement des parties prenantes et des consultations participatives avec les corps institutionnels et gouvernementaux locaux. Celles-ci sont incorporées dans des plans d'ACC qui sont traités soit, indépendamment les uns des

autres soit, intégrés aux informations relatives aux impacts potentiels dans les programmes d'aménagement et de développement actuels ou futurs (Ribeiro *et al.*, 2009). Par exemple, en Allemagne, dans la ville de Stuttgart, afin de réduire les problèmes de forte chaleur et de pollution de l'air, une politique favorisant la préservation des espaces ouverts et la présence de végétation dans les zones urbaines denses, a été mise en place (Carter, 2011).

1.2.2.2 Exemple des États-Unis

Aux États-Unis, les mesures passées et actuelles sont insuffisantes pour protéger les populations, ainsi que les biens et les propriétés (Bierbaum *et al.*, 2013). Les différents paliers gouvernementaux jouent alors un rôle important dans la planification de l'adaptation et de l'atténuation aux changements climatiques (Bierbaum *et al.*, 2013). Le gouvernement fédéral a élaboré le *National Action Plan : Priorities for managing freshwater resources in a changing climate* et le *National Ocean Policy Implementation Plan*. Ils découlent d'une évaluation, *U.S. National Climate Assessment*, qui est effectuée tous les quatre ans aux États-Unis (Bierbaum *et al.*, 2013; USGCCR, 2014).

Quant aux États, ils orientent la planification liée à l'ACC en quatre catégories:

- 1) l'éducation et la recherche;
- 2) la promotion et la facilitation des politiques existantes et des programmes pour l'amélioration de la résilience;
- 3) l'intégration de mesures adaptatives dans les politiques actuelles ou dans les processus de planification;
- 4) le développement de nouvelles politiques ou mesures pour réduire la vulnérabilité.

Par exemple, au Montana, un site Internet portant sur les changements climatiques a été créé, donnant accès en temps réel aux informations, outils et ressources

nécessaires liés à l'ACC. Par ailleurs, l'Alaska a instauré un programme d'atténuation (*Alaska Climate Change Impact Mitigation Program*) et, la Louisiane s'est dotée d'un plan d'adaptation, le *Comprehensive Master Plan for a Sustainable Coast 2012* (Bierbaum *et al.*, 2013).

Selon Carmin, Nadkarni et Rhie (2012), 298 gouvernements locaux américains participent à l'élaboration de plans d'adaptation et s'activent à leur réalisation (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 Quelques plans locaux d'ACC

| Plans d'ACC | Lieux | Sources |
|---|------------------|--|
| Climate Change Adaptation in New York City: Building a Risk Management Response | New York City | New York City Panel on Climate Change, 2010 |
| A Plan for New Hampshire's Energy, Environmental and Economic Development Future | New Hampshire | New Hampshire Climate Change Policy Task Force, 2009 |
| Preparing for a changing climate: The Chicago climate action plan's adaptation strategy | Ville de Chicago | Coffee <i>et al.</i> , 2010 |
| Strategy Climate Action Plan | King County | King County, 2012 |
| Adaptating to Climate Change: Planning a Climate Resilient Community | Ville de Keene | City of Keene et ICLEI, 2007 |

Finalement, aux États-Unis, le dernier niveau d'intervention en matière d'ACC correspond aux mesures prises par les communautés autochtones. En Alaska, divers plans d'adaptation ont été réalisés dans le village natif de Point Hope. Ils sont centrés

sur les impacts relatifs au climat et les actions potentielles pour résoudre les problèmes tels que la santé de la communauté (Brubaker *et al.*, 2010). Dans l'État de Washington, la communauté indienne tribale Swinomish cherche à identifier les événements liés aux changements climatiques et, à sensibiliser et prévenir la communauté. Elle s'aide des médias et des supports informatiques, et s'allie avec des organisations locales (Swinomish Indian Tribal, 2010; University of Oregon et USDA, 2010).

1.2.2.3 Exemple du Canada et du Québec

Au Canada, mettre en place des politiques et des mesures d'ACC pour faire face à la variabilité du climat est devenue une nécessité. Elle passe par la réduction de la vulnérabilité des villes face aux impacts négatifs liés aux changements climatiques. Elle suit trois étapes (Desjarlais *et al.*, 2004; Lemmen *et al.*, 2008):

- une identification des zones à risque;
- une révision des normes de conception des bâtiments et des équipements;
- et/ou,
- des investissements préventifs dans de nouvelles capacités de production ou de nouvelles infrastructures de service.

Ces mesures pratiques favoriseraient une diminution efficace des effets négatifs des changements climatiques (Desjarlais *et al.*, 2004). De plus, il est aussi important d'identifier les impacts positifs afin de prendre avantage de ces changements, comme dans le cas de la ville de Kristianstad (voir Introduction).

Par ailleurs, le gouvernement fédéral a élaboré et mis en place des mesures et des plans d'ACC dans les secteurs des ressources naturelles, de l'énergie, de la santé humaine, des environnements bâti et naturel, et des écosystèmes. Ils sont axés sur la planification à moyen et long termes, tout en considérant les effets et les impacts actuels et futurs prévus des changements climatiques (Warren et Lemmen, 2014). Par

exemple, en Colombie-Britannique, en Alberta et au Québec, les gouvernements provinciaux ont modifié les lignes directrices des plans dans le cadre du transfert de semences applicables aux activités de reboisement, en prenant en compte les impacts potentiels liés aux changements climatiques (Warren et Lemmen, 2014).

Dans la province de Québec, plusieurs plans et stratégies d'ACC ont été élaborés et mis en œuvre aux niveaux national, régional et municipal (Tableau 1.3).

Tableau 1.3 Quelques plans d'ACC au Québec

| Plans d'ACC | Sources | Description |
|---|----------------|--|
| Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020 | MDDEP, 2012b | Interventions pour augmenter la résilience de la société face aux changements climatiques et sensibiliser de la population aux principaux enjeux liés à l'ACC. |
| Plan d'action 2006-2012 – Le Québec et les changements climatiques : Un défi pour l'avenir | MDDEP, 2008 | Répertoire de 26 actions centrées sur l'ACC en matière de santé et sécurité publiques, de ressources, de territoire et d'environnement. |
| Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques | MDDEP, 2012a | Répertoire d'outils de réduction des émissions de GES et d'adaptation aux impacts des changements climatiques. |
| Guide d'élaboration d'un plan d'adaptation aux changements climatiques pour les municipalités | Ouranos, 2010 | Directives de mise en place d'un plan d'adaptation, contribuant à la résilience des municipalités aux changements climatiques. |

Cependant, au Québec, il n'existe pas de cadre législatif spécifique à l'ACC comme en Europe. Les mesures d'adaptation s'inscrivent dans des lois et des projets ciblés

(programmes, actions, stratégies) tels que l'eau, les infrastructures, la santé publique, etc. Leur gestion se fait à plusieurs échelles, basée sur des mesures incitatives. Elles figurent par exemple dans le développement durable qui est considéré comme une démarche en soi (MAMR, 2007; Aubé *et al.*, 2011; Larrivée, 2013).

1.3 Les plans d'adaptation aux changements climatiques à l'échelle urbaine

1.3.1 Éléments constitutifs des plans d'adaptation

Un plan d'adaptation correspond à un document indiquant les buts et les objectifs établis par un pays, une région, une ville ou une municipalité. Dans le cas des changements climatiques, il détermine les impacts sur les programmes, les activités et les infrastructures du gouvernement, et propose des mesures pratiques précises (Richardson et Otero, 2012). De plus, grâce au plan d'adaptation, le gouvernement national, régional ou local est capable de diffuser et communiquer les lignes directrices et les renseignements techniques (Richardson et Otero, 2012). Généralement, un bon plan d'adaptation assure la réduction des vulnérabilités des systèmes humains et naturels aux changements climatiques (Shaw, Colley et Connell, 2007). Le GIEC (IPCC, 2014a) rajoute que les évaluations d'adaptation sont restreintes aux vulnérabilités, aux impacts et à la planification de l'ACC. Seulement, un très petit nombre d'évaluations entame la phase d'implantation ou aborde les effets des mesures et des actions en matière d'ACC. À l'échelle urbaine, le plan d'adaptation est nécessaire pour favoriser le développement des villes en promouvant l'occupation du territoire et l'économie locale (Ahmed Mahmoud et El-Saya, 2011).

De surcroît, la revue de la littérature ne révèle pas de modèle général de plan d'adaptation. Selon les études, le nombre d'étapes de réalisation sont variables, mais certains éléments constitutifs sont similaires (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 Principes fondamentaux d'un plan d'adaptation

| Principes fondamentaux d'un plan d'adaptation | Sources |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Identifier les risques actuels et potentiels liés aux changements climatiques - Intégrer l'adaptation aux développements actuels et futurs d'une ville ou aux enjeux plus immédiats et locaux - Table de concertation des parties prenantes - Comprendre les vulnérabilités actuelles et identifier les seuils critiques - Comprendre la résilience au climat - Implantation, suivi et révision du plan d'ACC | <p>Füssel, 2007</p> <p>Shaw, Colley et Connell, 2007</p> <p>Sussman, 2009</p> <p>Ouranos, 2010</p> |

Ouranos (2010) propose notamment le contenu-type d'un plan d'adaptation:

1. Synthèse
2. Introduction
3. Contexte régional et local
4. Évaluation des impacts actuels du climat (municipalité ou région)
5. Impacts potentiels et analyse des vulnérabilités
6. Estimation des risques actuels et/ou potentiels
7. Options pour la gestion des risques (mesures d'adaptation)
8. Calendrier de mise en œuvre
9. Mécanismes de suivi et de mise à jour
10. Communication et diffusion

Par ailleurs, l'adaptation se doit d'être planifiée parallèlement à l'élaboration de politiques. La planification et l'élaboration reposent sur l'identification détaillée et la clarification des risques encourus par les communautés (Smith *et al.*, 2001). Baynam (2011) évoque une approche centrée sur les phénomènes liés aux changements climatiques. Via leur modélisation, il est possible d'anticiper les risques relatifs à ces

changements, et de réagir de manière adéquate grâce à des stratégies d'adaptation. Néanmoins, plus de recherches, d'exemples de mesures d'adaptation et de pratiques doivent être réalisés pour atteindre une meilleure identification des signaux liés aux changements climatiques et ainsi pouvoir s'adapter graduellement à leurs effets (Burghard, Sven et Wolfgang, 2010).

1.3.2 Démarche d'élaboration et outils

Suivant les principes fondamentaux d'un plan d'ACC à l'échelle urbaine, son élaboration comporte plusieurs étapes. Celles-ci sont variables d'une étude à l'autre; néanmoins, la démarche d'élaboration d'un plan d'ACC reste similaire. Ouranos (2010, p. 30) en propose une en cinq étapes accompagnées d'une étape préalable. La première étape a pour but d'identifier et de comprendre les facteurs et les phénomènes climatiques qui affectent le climat actuel au niveau municipal. La deuxième étape consiste à évaluer les différentes possibilités d'évolution du climat dans le futur à partir d'analyses sur des projections de changements climatiques. La troisième étape permet de mieux évaluer les risques par leur identification, leur classification et leurs priorités. Ici, sont considérés deux facteurs, la probabilité d'occurrence d'un phénomène, et l'ampleur des conséquences. L'avant-dernière étape vise à mettre en place des options d'adaptation (ex.: programmes de prévention), tout en concentrant l'effort sur la réduction des deux facteurs cités précédemment. Enfin, la dernière étape d'élaboration assure la production du plan d'ACC à partir de l'ensemble des informations recueillies aux étapes précédentes. Celui-ci est ensuite communiqué aux acteurs sociaux concernés (décideurs, experts et/ou citoyens). Pour élaborer ce plan, l'équipe Ouranos (2010, p. 31) propose quelques lignes directrices à suivre:

- « engagement et participation des intervenants et des parties prenantes;
- communication efficace et transparente de la démarche;
- promotion d'un développement durable;

- utilisation des ressources existantes;
- révision périodique du plan ».

L'équipe de Greene et Robichaud (2010) procède également de la même façon, mais en quatre étapes:

- 1) apprendre à connaître la communauté;
- 2) connaître les vulnérabilités actuelles et futures liées aux changements du climat;
- 3) développer une stratégie d'adaptation;
- 4) réaliser le plan d'adaptation.

Plus concrètement, prenons exemple de la ville de Stratford, au Canada (Richardson et Otero, 2012). Les décideurs municipaux et les urbanistes ont mis au point un plan stratégique axé sur le long terme afin que la ville de Stratford puisse faire face aux changements climatiques. Le déroulement de mise en place de ce plan s'est réalisé en quatre phases:

- 1) constituer un groupe de travail cadre pour établir les objectifs fondamentaux et effectuer la recherche nécessaire sur l'impact des changements climatiques sur la collectivité;
- 2) organiser des assemblées publiques dans le but d'évaluer les vulnérabilités actuelles et futures;
- 3) effectuer une évaluation du risque pour établir le classement des effets les plus importants des changements climatiques et déterminer les zones prioritaires où les mesures d'adaptation doivent être envisagés;
- 4) préparer un plan d'adaptation final comportant des mesures d'adaptation recommandées par thème.

Parallèlement, la réalisation d'un plan d'adaptation urbain nécessite des outils et des moyens rattachés à l'aménagement du territoire et à l'urbanisme, et qui puissent être

utilisés par les acteurs sociaux concernés pour traiter d'enjeux à la fois urbains et ruraux. Par exemple, ces outils peuvent favoriser la diminution de la fragmentation du territoire, et de la biodiversité locale et régionale, ainsi que valoriser le paysage (Colombert et Boudes, 2012).

Richardson et Otero (2012) rapportent que les outils les plus employés par les experts tels que les urbanistes, sont les outils de planification. Ils sont utilisés pour diminuer les risques liés aux changements climatiques en informant les intervenants et les décideurs de ceux-ci, et des possibilités qui s'offrent. Ces outils ont pour avantage d'inciter au dialogue sur les mesures d'adaptation et de le faire avancer. D'ailleurs, les plans locaux sont souvent élaborés dans le cadre d'un processus de planification officielle. De plus en plus de municipalités, en particulier au Canada, ont produit des plans spécifiques centrés sur la nécessité de s'adapter aux changements climatiques. À ces outils, s'ajoutent ceux d'aide à la prise de décision qui ont pour but d'aider les décideurs à élaborer et à mettre en œuvre des plans et des politiques d'ACC.

De plus, les outils de planification (ex.: politiques, plans d'urbanisme) servent d'appui dans l'énoncé clair des préoccupations locales et permettent de se doter d'un plan d'action. Ce dernier démontre l'engagement de la municipalité à agir de manière proactive en matière d'environnement, de développement durable ou de bâtiment durable. Il contient aussi la définition des moyens pour favoriser les projets précis sur le territoire. Quand au plan d'urbanisme, il s'agit d'un outil important de planification de l'aménagement du territoire, assurant la cohérence dans les choix d'interventions. Il permet de définir des politiques en matière d'implantations, d'équipements ou d'infrastructures et de coordonner les interventions et les investissements des différents services municipaux. Un plan d'urbanisme sert à faire connaître les intentions à la base du contrôle que le conseil peut vouloir exercer dans l'application des règlements d'urbanisme (Boucher et Blais, 2010).

1.3.2.1 Lien avec les théories de la planification

Depuis les années soixante, cinq grands courants théoriques ont influencé et influencent encore la façon dont la planification est exercée. Il s'agit de la planification rationnelle, la planification stratégique, la planification incrémentielle, la planification justificative et la planification concertée (voir Annexe B). Chaque courant théorique implique une façon particulière d'envisager le cycle de planification, ses étapes, le rôle des experts et d'autres acteurs, la prise en compte des échelles spatiales et temporelles, etc.

Cette recherche s'insère dans une approche théorique intégrant les acquis et les forces de la planification stratégique et de la planification concertée. Le cycle d'approche typique de la planification stratégique implique les étapes suivantes (Geertman et Stillwell, 2004; Greene et Robichaud, 2010; Ouranos, 2010):

- 1) l'identification d'un problème;
- 2) la formulation d'un plan accompagnée d'une évaluation;
- 3) la modélisation de données;
- 4) la projection et la réalisation de scénarios d'évolutions;
- 5) la production du plan d'adaptation;
- 6) le suivi et la révision du plan d'adaptation.

Les apports de la planification concertée résident au niveau des processus participatifs.

Aujourd'hui nécessaire, la mise en place des mesures d'ACC requiert des années de travail en planification, en implantation et en aménagement (Sussman, 2009; Quenault, 2012). La définition de ces mesures est influencée par l'évolution des procédures de planification et des critères techniques associés (Hallegatte, de Perthuis et Lecocq, 2010). En planification stratégique, ces auteurs abordent, préalablement et durant le processus de planification, les questions de territoire en termes d'espace et

de temps (long terme, superficie), d'incertitude et d'anticipation des événements futurs, ainsi que de risques actuels et potentiels. Les décisions sur l'ACC sont prises selon la capacité de satisfaire les besoins communautés au sein des systèmes naturels et humains à court et à long termes, ou de réparer les dégâts et les dommages collatéraux dans les situations d'urgence (Quenault, 2012). Les programmes, les plans ou les politiques en matière d'ACC reposent généralement sur une prévision à long terme et/ou à très long terme, comme par exemple cent ans (Rosenzweig *et al.*, 2007; Hallegatte, de Perthuis et Lecocq, 2010). Toutefois, suite à l'implantation d'un plan d'ACC, son suivi et sa révision peuvent se faire sur le court, moyen et/ou long termes (Sussman, 2009; Greene et Robichaud, 2010; Ouranos, 2010).

Les procédures d'ACC deviennent progressivement une pratique usuelle de par leur intégration dans les plans de développement durable aux échelles municipale et locale, en Europe et en Amérique du Nord (Causley, 2008; CGAM et ADAAM, 2010). Par exemple, Causley (2008) fait référence aux *Integrated Community Sustainability Plan* ou *Official Plan* qui correspondent à différents plans d'ACC élaborés au travers du Canada. De ce fait, l'adaptation, planifiée sur le long terme, permet d'anticiper les phénomènes liés aux changements climatiques et de trouver des mesures appropriées et adéquates aux situations d'urgence, actuelles et futures (Colombert et Boudes, 2012). Par exemple, Greene et Robichaud (2010) expliquent que les communautés locales sur le territoire canadien devront utiliser et intégrer à leur quotidien des politiques et des outils nouveaux et innovateurs afin d'affronter les changements climatiques, notamment en s'adaptant à leurs effets.

Par ailleurs, les courants théoriques de planification influencent aussi la construction et l'évaluation des scénarios d'évolutions en adaptation, notamment dans la prise en compte du long terme. Ainsi, des principes ou des critères sont utilisés, en particulier pour la gestion des risques sur les infrastructures durables liés aux changements climatiques (Smit et Wandel, 2006; Rosenzweig *et al.*, 2007).

Dans le cadre de la planification de l'ACC, la génération de scénarios d'évolutions constitue un outils d'aide pour déterminer comment les changements climatiques affectent potentiellement les communautés au sein des systèmes naturels et humains. Ces scénarios constituent ainsi autant d'opportunités d'explorer les effets de nouvelles mesures d'adaptation sur le long terme et de les actualiser (Richardson et Otero, 2012). De surcroît, leur génération s'appuie sur la modélisation de types simulation et/ou optimisation, notamment dans le cadre d'une prospective et d'une approche par scénarios (Bailly, 1974; Gauthier, Simard et Waaub, 2011; Waaub, 2013).

1.3.2.2 Modélisation: le cadre conceptuel

La modélisation est particulièrement indiquée pour aborder des problèmes complexes faisant intervenir de nombreuses variables, tel que celui faisant l'objet de ce projet. Elle est utilisée pour construire des scénarios d'évolutions à moyen et/ou long termes, et pour voir comment le modèle évoluera sous différentes conditions contrôlées par la variation d'une ou plusieurs variables (Navarro *et al.*, 2009). Un exercice de modélisation implique de définir la structure du modèle, c'est-à-dire sa représentation graphique ou symbolique. Cette représentation sert à évaluer et à visualiser les flux et les états du modèle afin de faire ressortir les relations entre les éléments constituant le modèle (Sanders, 2006; Musy *et al.*, 2012; Waaub, 2013). Le scénario contribue alors à mettre en évidence les évolutions possibles d'un système selon différents paramètres (Musy *et al.*, 2012; Waaub, 2013).

Il importe toutefois de faire la différence entre modèle et scénario. En effet, le modèle correspond à la représentation schématique que nous avons d'un système étudié à partir des connaissances existantes (Le Moigne, 1987). Selon Van der Maren (2003, p. 200), un modèle est « [...] constitué[s] d'une série de formules reliant les variables. Plus le phénomène modélisé est complexe, plus le programme [...] est long et

complexe [...] ». Il met en évidence les relations entre les composantes du système étudié et les impacts potentiels qui affectent et/ou affecteront l'environnement (Gauthier, Simard et Waaub, 2011), amenant à une meilleure compréhension de son fonctionnement. Quant au scénario, il est caractérisé par une ou plusieurs hypothèses pour « créer, poursuivre » l'histoire d'un système étudié, par exemple, à partir des tendances actuelles. Il fait ressortir les futurs possibles et/ou plausibles définis à partir des connaissances acquises et nouvelles sur une échelle de temps à court, moyen et/ou long termes (Houet, Hubert-Moy et Tissot, 2007; DÉPÉ, 2009).

1.3.3 Place des îlots de chaleur urbains dans les plans d'adaptation aux changements climatiques à l'échelle urbaine

Le phénomène des ICU (voir section 1.4.1) représente un des enjeux importants auxquels sont confrontées les villes, incluant le territoire de la CMM. Le réchauffement localisé du climat est étroitement lié à l'urbanisation et donc, présents dans les centres urbains (Anquez et Harlem, 2011; Colombert et Boudes, 2012). Leurs microclimats sont modifiés en fonction des densités et de leurs caractéristiques thermiques et radiatives (Colombert et Boudes, 2012). En plus des changements climatiques, les villes sont des amplificateurs d'ICU (INSPQ, 2001-2010; Colombert et Boudes, 2012). Ces derniers ne sont pas sans conséquences, car ils engendrent des impacts négatifs sur l'environnement naturel (ex.: transmission de maladies vectorielles) (IPCC, 2014a) et bâti (ex.: bâtiments peu ventilés sans ou peu de fenêtres) (Roy *et al.*, 2011), ainsi que sur la santé humaine (ex.: troubles respiratoires, décès) (Anquez et Harlem, 2011; BNQ, 2013). Par ailleurs, l'Institut National de la Santé Publique du Québec (INSPQ, 2001-2010) insiste sur le fait que des mesures d'adaptation aux îlots de chaleur sont nécessaires dans les milieux urbains. Elles assurent la diminution des effets négatifs de la chaleur sur la santé humaine (ex.: création de zones d'ombre, limitation de l'utilisation des destructeurs d'ozone), et allègent les pressions sur les personnes vulnérables. Elles s'appliquent également dans des domaines connexes liés à l'architecture urbaine et à

l'aménagement territorial. Ces mesures d'adaptation se traduisent par de la végétalisation (ex.: espaces verts boisés, murs végétalisés) et sont mises en application dans le cadre des infrastructures urbaines, de la gestion durable des eaux pluviales et de la réduction de la chaleur causée par les activités humaines.

Ainsi, l'installation de matériaux réfléchissants, l'accès à des zones de rafraîchissement (ex.: fontaines d'eau), l'humidification des sols, la favorisation de l'évaporation, le contrôle de la demande de climatisation, ainsi que la réduction du parc automobile en ville sont tous des exemples de mesures d'actions en matière d'ACC liée au phénomène des ICU (INSPQ, 2001-2010).

Le phénomène des ICU a une part importante dans la planification de l'ACC à l'échelle des villes. Par conséquent, les milieux urbains sont les premiers lieux où les ICU se doivent d'être réduits localement (Anquez et Harlem, 2011; Colombert et Boudes, 2012). Il est plus facile d'agir rapidement et efficacement à petite échelle qu'à grande échelle, contribuant de façon indirecte à diminuer les risques liés aux changements climatiques. Généralement, la planification de l'ACC en matière d'ICU se caractérise par l'élaboration et l'application de plans, de politiques et de programmes de développement durable, de mise en valeur environnementale ou de verdissement (INSPQ, 2001-2010; Boucher et Blais, 2010; Baudouin *et al.*, 2011). D'ailleurs, Ahmed Mahmoud et El-Saya (2011) stipulent que la planification durable d'une ville passe par le redéveloppement et la planification des espaces verts et de la structure urbaine.

En réalité, il existe plusieurs formes de plans d'adaptation liés aux ICU. Par exemple, au Canada, l'agglomération et la Ville de Montréal ont respectivement mis en place un schéma d'aménagement et un plan d'urbanisme, qui incluent des mesures d'aménagement urbain, et des politiques locales sectorielles et spécifiques. La Ville de Montréal a aussi participé à l'élaboration du PMAD de la CMM (Baudouin *et al.*,

2011). Aux États-Unis, de plus en plus de municipalités mettent en place des politiques d'aménagement urbain, en particulier dans le secteur du bâtiment durable (Boucher et Blais, 2010). Ses politiques sont axées sur par exemple, la diminution de la consommation en eau, le phénomène des ICU, les coûts de construction et d'entretien des infrastructures, à la gestion des matières résiduelles, ou encore la contribution à la santé et au bien-être des usagers en prenant compte de la spécificité des municipalités. Au Québec, la *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme*, la *Loi sur les compétences municipales* et le *Code de la construction du Québec* posent les principales balises légales encadrant l'action municipale en matière d'infrastructure urbaine durable (Boucher et Blais, 2010).

1.4 Les îlots de chaleur urbains

1.4.1 Définitions et liens avec les changements climatiques

Selon Environnement Canada cité par Baudouin et Cavayas (2008, p. 49), le phénomène d'ICU se définit comme des « [...] zones urbaines, caractérisées par des températures estivales plus élevées que l'environnement immédiat avec des différences qui varient selon les auteurs de 5 à 10°C » (Figure 1.1). Il est présent sous trois formes (Lachance, 2005; BNQ, 2013):

- l'ICU de surface (*surface urban heat island*): observé dans certains endroits des villes où les surfaces sont les plus chaudes, il est détecté par la lecture des rayons infrarouges émis et réfléchis par les surfaces;
- l'ICU de la canopée urbaine (*canopy layer urban heat island*): la canopée est une couche d'air entre le sol et la cime des arbres et/ou entre le sol et les toits des bâtiments. Généralement, ces zones se situent principalement là où les activités anthropiques ont lieu;
- l'ICU de la couche limite atmosphérique (*boundary layer urban heat island*): il est décelé au-dessus de la canopée.

Ces deux dernières formes se caractérisent par la température de l'air (BNQ, 2013). Dans cette étude, nous nous intéressons aux îlots de chaleur de surface⁴ qui sont davantage représentatifs des différences de températures à l'échelle des villes (Lachance, Baudouin et Guay, 2006), et de la température de l'air⁵.

Pourquoi l'effet îlot de chaleur urbain

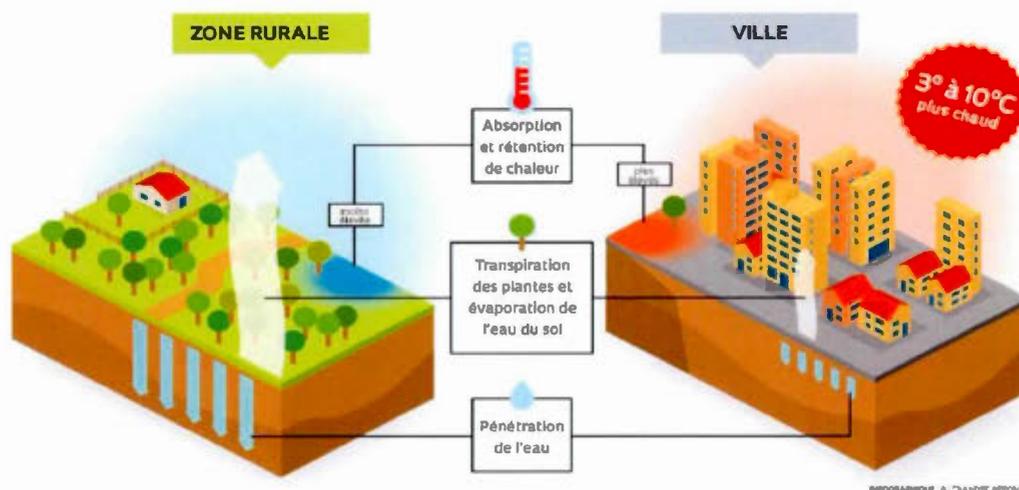


Figure 1.1 Effet d'un îlot de chaleur urbain: comparaison entre la zone rurale et la ville (Tirée de Pivetta, 2012)

Par ailleurs, Cantat (2004), en s'appuyant sur l'exemple de la ville de Paris, répertorie les ICU en trois catégories:

- fort ICU: +11,4°C maximum;
- moyen ICU: [2,3-11,4°C];
- faible ICU: +2,3°C maximum.

Il rajoute que ces valeurs sont subjectives et dépendent des données récoltées.

⁴ Formes sous lesquelles les données d'ICU ont été collectées.

⁵ Elle est nécessaire aux tests statistiques préliminaires lors de l'analyse des données.

Observables à l'échelle urbaine, les ICU participent au réchauffement climatique de par leur effet d'augmentation locale de la température (Houle, 2009). La continuelle amplification de la variabilité du climat entraîne des sécheresses, des canicules ou des vagues de chaleur, influencées par une hausse de température (Lemmen *et al.*, 2008; Lareau Carpentier, 2012; BNQ, 2013). Les ICU sont affectés par ces événements climatiques de façon indirecte et sont donc liés aux changements climatiques (Lachance, 2005; Lachance, Baudouin et Guay, 2006; IAU ÎdF, 2010a; INSPQ, 2001-2010). La fréquence et l'intensité des ICU sont conditionnées selon une base journalière et saisonnière. En été (juin, juillet et août), les ICU sont plus importants lors des journées chaudes et sont associées à une augmentation de l'amplitude et de la fréquence des vagues de chaleur (Baudouin et Cavayas, 2008; ICIS, 2011; BNQ, 2013). Outre la température, il existe d'autres facteurs, naturels et urbains, qui sont associés au phénomène des ICU (Lachance, Baudouin et Guay, 2006):

- climatiques: vent, clarté du ciel, pollution atmosphérique;
- géographiques: emplacement de la ville;
- structurels: taille de la ville, rapport entre les surfaces minéralisées et végétalisées, occupation du sol sur le territoire;
- morphologiques: densité du bâti, concentration et taux de croissance des espaces verts;
- énergétiques: rejets induits par la consommation d'énergie;
- politiques: pratiques urbaines d'aménagement du territoire.

La formation des ICU dans les villes est souvent associée à un manque de circulation d'air entre les bâtiments ou à une diminution de la vitesse des vents, induisant un réchauffement du bâti (IAU ÎdF, 2010a, 2010b; Soares, Vandroux et Magalon, 2010; Merahi, 2014). De plus, les ICU ont un effet immédiat sur la qualité de l'air, en participant à la diffusion des polluants dans l'atmosphère (ex.: dioxydes de soufre et d'azote, monoxyde de carbone), et à l'effet de smog (Giguère, 2009; ICIS, 2011). Martin (2008) mentionne aussi que la dégradation de la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments entraîne une multiplication d'acariens, de bactéries et de moisissures

ainsi qu'une émanation de produits toxiques de type formaldéhyde. Il en résulte des effets négatifs sur la santé humaine (ex.: asthme, allergies) (INSPQ, 2001-2010).

Les villes sont des lieux propices à la formation et à l'amplification des ICU, en particulier les centres urbains (Martin, 2008; ICIS, 2011). Ces derniers présentent un environnement bâti beaucoup plus dense comparé à celui en périphérie urbaine ou en zone rurale (Baudouin et Cavayas, 2008). Un tel environnement favorise le réchauffement du climat localement, en raison de la présence de facteurs comme l'albédo, les reliefs du bâti, le type, la couleur et l'imperméabilité des matériaux de construction des bâtiments (BNQ, 2013; Delacour, 2013; Merahi, 2014). Par exemple, si des bâtiments sont construits à partir de matériaux imperméables de couleur foncée avec un faible albédo comme l'asphalte, alors c'est un lieu favorable aux ICU. Dans ces conditions, une grande quantité de chaleur solaire est stockée dans les bâtiments et est transférée la nuit dans l'atmosphère. Les nuits deviennent alors beaucoup plus chaudes. Aussi, une absence ou une faible densité de végétation accentue le phénomène des ICU (Fernandez et Deshaies, 2011; ICIS, 2011).

Les rejets induits par la consommation d'énergie fossile constituent un facteur influant sur la présence des ICU et sur le réchauffement climatique (Baudouin et Cavayas, 2008; Anquez et Herlem, 2011). Ils sont souvent dus aux émissions de GES liées aux infrastructures physiques, aux secteurs d'activités, au transport et à la climatisation des bâtiments (AMT *et al.*, 2008; IAU ÎdF, 2010b; AECOM Tecslut Inc., 2012). Ces phénomènes conduisent à la présence de flux et à un dégagement de chaleur qui contribuent également à la formation et à l'amplification des ICU (Baudouin et Cavayas, 2008; Anquez et Herlem, 2011; Merahi, 2014).

1.4.2 Outils d'identification, de mesure et de suivi des ICU

Selon l'approche conventionnelle, le phénomène d'ICU se mesure par la comparaison de la température de l'air « urbain » à celle de l'air « rural ». Après avoir évalué la température de l'air sur plusieurs sites d'étude, la différence de température entre ces sites classés comme « urbains » ou « ruraux » indique la magnitude d'un îlot de chaleur (Stewart et Oke, 2012). Celle-ci est détectable en raison de l'interaction entre le rayonnement solaire et la forte variabilité des constituants atmosphériques. Tandis qu'une part du rayonnement est réfléchi, l'autre part se voit absorbée par la surface terrestre. Plus le rayonnement solaire absorbé est élevé, plus la température de l'air augmente et donc, plus la chaleur est importante (Stewart et Oke, 2012).

Par ailleurs, les ICU sont thermiquement identifiés via la méthode de télédétection qui se base sur des images prises par les satellites Landsat. Ces images sont enregistrées sous format matriciel, qui est exploité à l'aide d'un Système d'Information Géographique (Martin, 2008; Lareau Carpentier, 2012). Les images thermiques prises par des satellites présentent des résolutions variant de 60 à 120 mètres. Toutefois, pour les images thermiques aéroportées, la résolution peut être d'au moins un mètre. La qualité des images thermiques dépend entre autre de conditions météorologiques telles l'anticyclone, le mouvement de l'air (topographie ou masse d'air), l'absence de vent, la couverture nuageuse, l'évaporation et les propriétés du sol (Lareau Carpentier, 2012). La télédétection permet ainsi de localiser et de déterminer l'amplitude des ICU, et d'identifier les densités du bâti et de la végétation (Martin, 2008). De plus, Martin (2008, p. 48) explique que « La télédétection a la capacité d'observer l'évolution de ces différences de température dans l'espace et dans le temps, offrant ainsi la possibilité aux autorités publiques de mieux comprendre et anticiper la dynamique thermique d'une ville comme Montréal ».

1.4.3 Impacts des îlots de chaleur urbains sur la santé humaine

La santé humaine est affectée par la variabilité du climat de façon directe et indirecte, soit par les phénomènes météorologiques extrêmes (ex.: vagues de chaleur, sécheresse), soit par des perturbations écologiques (ex.: transmission de maladies vectorielles, mauvaises récoltes) ou des réponses sociales (ex.: déplacement des populations suite aux longues sécheresses) liées aux changements climatiques (IPCC, 2014a). Au Canada, des épisodes de hausses soudaines et de courte durée du nombre de personnes décédées ont été répertoriées (Warren et Lemmen, 2014). Elles seraient en corrélation avec la température quotidienne maximale dans certaines villes canadiennes. Les chercheurs s'attendent notamment à ce que la durée, la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur s'accroissent (NCEH, 2013; Warren et Lemmen, 2014). Le *National Center for Environmental Health* (NCEH, 2013) constate qu'aux États-Unis, l'exposition à la chaleur extérieure peut causer des crampes, augmenter l'inconfort et la fatigue, voire conduire à la mort. Elle est aussi associée à une hausse du taux d'hospitalisation et d'urgence. De plus, les vagues de chaleur extrême induisent des troubles respiratoires, cardiaques et de la conscience, des syncopes, des coups de chaleurs et un stress thermique (Hajat, O'Connor et Kosatsky, 2010; Warren et Lemmen, 2014). Les experts prévoient d'ailleurs une « augmentation dramatique » de la mortalité de la population liée à la chaleur extrême selon les scénarios d'émissions de GES les plus élevés. Toutefois, ces résultats de prédiction restent imprécis (NCEH, 2013).

Les impacts des ICU sur la santé humaine se font davantage ressentir sur les populations vulnérables et celles fortement exposées à la chaleur (NCEH, 2013). Plusieurs auteurs (Roy *et al.*, 2011; Lareau Carpentier, 2012; Warren et Lemmen, 2014) ont mentionné par exemple, les personnes âgées de 65 ans et plus, à mobilité réduite et défavorisées sur le plan socio-économique, les jeunes enfants, les travailleurs extérieurs, les sportifs et les athlètes de haut niveau, ainsi que les

personnes atteintes de maladies chroniques, les Autochtones et les résidents des collectivités nordiques et éloignées. Diverses études ont fourni des schémas explicatifs tels que Bouchama *et al.* (2007) et ICIS (2011), pour qui les personnes défavorisées sur le plan socio-économique n'ont généralement pas accès à la climatisation ou aux espaces frais et verts et/ou habitent dans des bâtiments peu ventilés, voire sans ou avec peu de fenêtres, et dans des édifices en hauteur à des étages supérieurs. Les risques d'exposition à la chaleur extrême ou au phénomène d'ICU peuvent être amplifiés par l'absence d'infrastructures adaptées et de services adéquats ou dans les zones résidentielles et vulnérables de faible qualité de vie (IPCC, 2014a). À Montréal, 106 personnes ayant des problèmes de santé mentale sont possiblement ou probablement décédées en raison de la canicule de 2010. Cette dernière a par ailleurs duré cinq jours consécutifs avec une température moyenne maximale de 33°C (Roy *et al.*, 2011).

De surcroît, une corrélation entre les phénomènes météorologiques extrêmes ou les dangers naturels (ex.: avalanches, tsunamis, etc.) et l'incidence négative sur la santé mentale a été démontrée (Salcioglu, Basoglu et Livanou, 2007; Warren et Lemmen, 2014). Plus la fréquence, la gravité et la durée de ces phénomènes sont élevées, plus il y a une incidence négative sur la santé mentale (Warren et Lemmen, 2014). Les populations sont alors exposées à des situations d'angoisse ou d'anxiété, et à des événements susceptibles d'avoir des effets sur la santé publique (ex.: blessures causées par des débris volants, interruptions de services de soins de santé) (Ostry *et al.*, 2010; Auger *et al.*, 2011).

Par ailleurs, les populations vulnérables sont aussi affectées par les perturbations de l'environnement social et du milieu naturel. Celles-ci se manifestent par des troubles cognitifs (ex.: problèmes de concentration, troubles de l'apprentissage), des troubles émotionnels (ex.: troubles de stress aigu et d'agressivité) et/ou des comportements à risque et de l'abus de substances chez les adolescents (Somasundaram et Van De Put,

2006; Boon *et al.*, 2011). Ces perturbations conduisent bien souvent à des effets psychosociaux tel qu'une perte de sentiment d'appartenance à une collectivité et à des effets sur la santé mentale, tels que des niveaux de stress et de détresse accrus et des modifications de l'humeur, des pensées et des comportements, qui affectent de façon importante le quotidien d'une personne (Warren et Lemmen, 2014).

1.4.4. Mesure de lutte contre les îlots de chaleur urbains

De nos jours, les villes mettent graduellement l'emphase sur la lutte aux ICU. Celle-ci s'inscrit dans la mise en œuvre de pratiques urbaines favorables au développement des espaces verts, et à la protection des espaces bleus et des écosystèmes aquatiques (Baudouin et Cavayas, 2008; INSPQ, 2001-2010; Fernandez et Deshaies, 2011). D'une part, ces pratiques correspondent aux mesures d'atténuation à l'échelle mondiale et d'adaptation à l'échelle locale, dans le cadre de l'aménagement urbain. Les unes se caractérisent par la réduction des émissions de GES, causes anthropiques des changements climatiques. Les autres⁶ s'appliquent de manière locale au travers de plans d'actions et de politiques municipales, tel le cas de la Ville de Montréal (IAU ÎdF, 2010a; Anquez et Herlem, 2011). D'autre part, la lutte contre les ICU est liée au verdissement (ex.: plantation, agriculture urbaine), et est synonyme de lieux de rafraîchissement (ex.: ombrage, parcs à eaux) et de socialisation (ex.: activités communautaires et collectives), s'accompagnant d'une amélioration des conditions de vie de chacun (Nature Québec, 2014). Donc, l'objectif de ces mesures est de réduire de manière directe ou indirecte la vulnérabilité des systèmes naturels et humains à ce phénomène, à l'échelle locale.

La lutte contre les ICU repose sur deux mesures: une augmentation de la réflectivité des surfaces et celle de la présence de végétation en ville (Velazquez, 2005). Ces

⁶ Pour plus de détails, vous réferez au document UAU ÎdF (2010a), p. 22-23. des organigrammes de mesures de lutte aux ICU y sont proposés.

mesures se traduisent par l'implantation de toits et de trottoirs froids (Figure 1.2) (Baudouin et Cavayas, 2008). L'idée est de créer des espaces rafraîchissants pour atténuer la température et donc, la sensation de chaleur intense, d'inconfort et de stress thermique ressentie par la population. Elles assurent également la protection de l'environnement, en diminuant par exemple, les émissions de GES et la pollution atmosphérique. Les mesures de lutte se caractérisent par des actions de verdissement, de gestion des eaux pluviales, de contrôle des sources de chaleur anthropique et par des actions concernant les infrastructures (Giguère, 2009), tels que des toitures et des murs végétalisés, des toits et des bâtiments blancs ou encore des parcs, des bois urbains et la végétalisation des rues (Baudouin et Cavayas, 2008; Fernandez et Deshaies, 2011; Nature Québec, 2014). De plus, il ne faut pas négliger que ces mesures engendrent des bénéfices collatéraux, comme par exemple les toits verts accessibles pouvant devenir des lieux de rencontre et des zones récréatives, qui augmentent l'interaction et la cohésion sociales (Velazquez, 2005).

Par ailleurs, les plantes rafraîchissent l'air par leur capacité d'évaporation et d'évapotranspiration, et offrent de l'ombre par leur feuillage (Figures 1.2 et 1.3). Les espaces bleus tels que les lacs, les rivières, l'arrosage, etc., assurent un rafraîchissement de la ville, ce qui induit un contre-effet aux ICU (Baudouin et Cavayas, 2008; ICIS, 2011). Les mesures de lutte passent aussi par la sensibilisation de la population et par la bonne circulation de l'information. De cette façon, la population anticipe les effets des vagues de chaleur et des ICU, et prévoit à l'avance les mesures nécessaires pour faire face à ces phénomènes (Martin, 2008).

Notons aussi que la vue et le contact avec un paysage naturel ou des espaces verts produisent une diminution du stress, de l'agressivité et de la pression sanguine, ainsi qu'un relâchement des tensions musculaires pour laisser place à une augmentation du sentiment de calme, à la méditation et à l'attention (Velazquez, 2005).

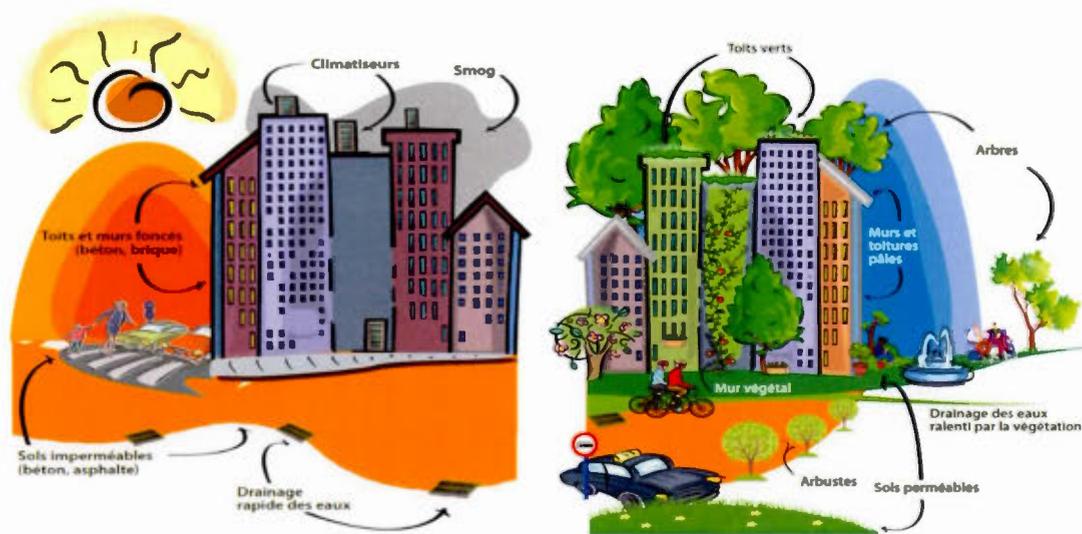


Figure 1.2 Illustrations des conditions favorisant les îlots de chaleur (à gauche) et les îlots de rafraîchissement (à droite) (Tiré de Fernandez et Deshaies, 2011, p. 25)

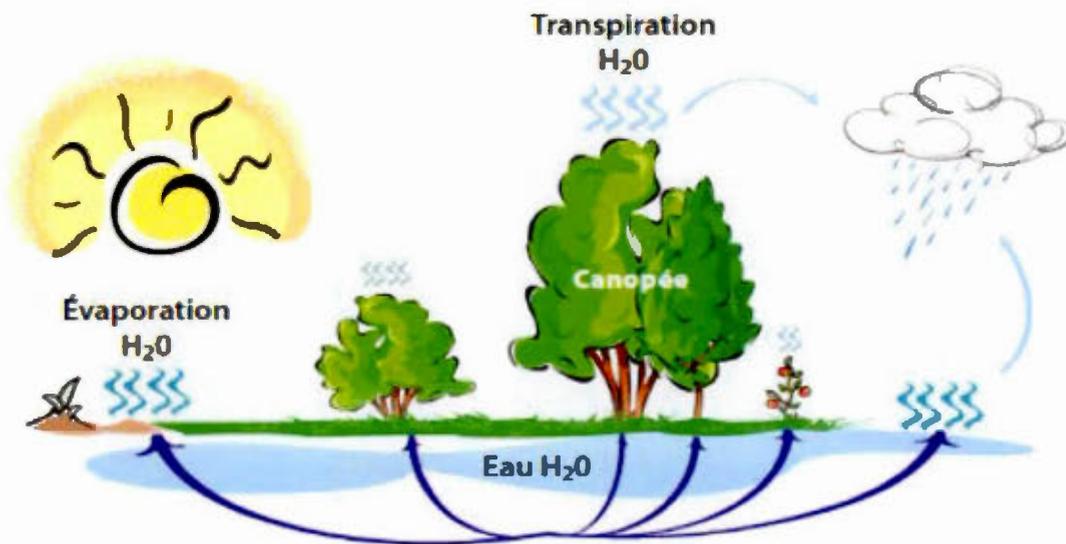


Figure 1.3 Schéma du cycle d'évaporation et d'évapotranspiration des plantes (Tiré de Fernandez et Deshaies, 2011, p. 25)

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Introduction

Ce chapitre aborde les outils et les moyens utilisés pour répondre aux objectifs secondaires de ce mémoire de recherche. Dans une première partie, la démarche méthodologique est discutée. Par la suite, l'accent est mis sur la collecte des données et l'analyse de la littérature sur les plans d'adaptation aux changements climatiques en réponse au premier objectif secondaire. La dernière partie correspond à l'illustration de l'apport de la modélisation du phénomène des ICU à l'aide de la plateforme de simulation Stella. Elle a pour but de répondre au deuxième objectif secondaire.

2.2 Démarche méthodologique

2.2.1 Approche globale

La méthodologie de recherche comporte trois étapes: la constitution des intrants, le pré-traitement et enfin, le traitement (Figure 2.1).

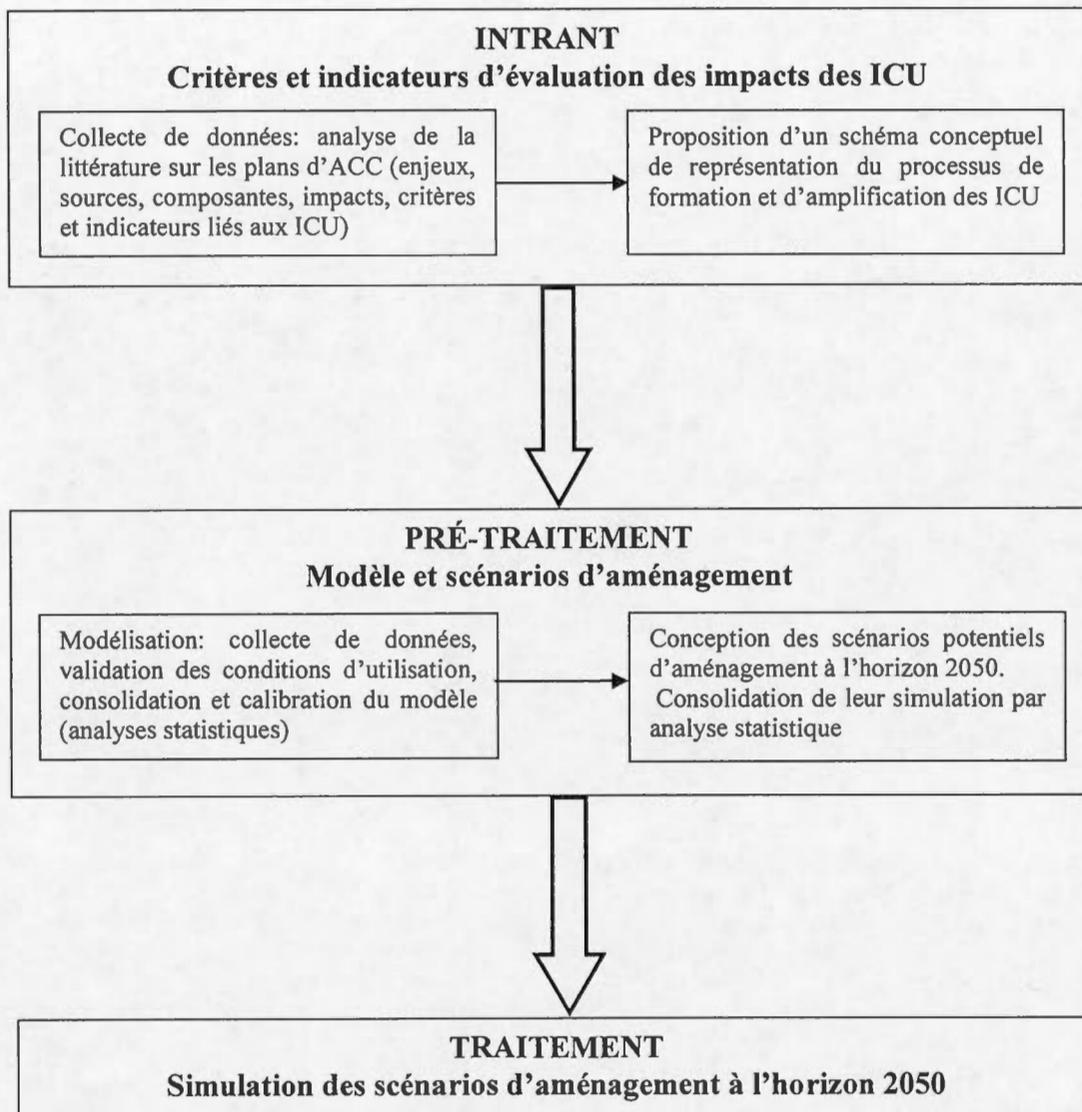


Figure 2.1 Démarche méthodologique

La première étape se divise en deux phases (Figure 2.1). Une analyse de la revue de la littérature est d'abord effectuée afin de relever les enjeux, les critères et les indicateurs d'évaluation des impacts des ICU à l'échelle des communautés urbaines. Leur pertinence s'inscrit dans le cadre de leur application à une étude de cas correspondant au territoire de la CMM. Cette revue est réalisée de manière la plus exhaustive possible. Ensuite, un schéma conceptuel de la représentation du processus

de formation et d'amplification des ICU est produit à partir de l'analyse précédente. Il représente les interactions entre les différents éléments constituant le phénomène des ICU. Ce schéma est révisé suite aux analyses statistiques de pré-traitement.

La deuxième étape comporte aussi deux phases, cette fois centrées sur la modélisation et la simulation des scénarios d'aménagement. D'une part, des tests statistiques (voir Annexe C) sont effectués dans le but de valider les données recueillies pour la simulation des scénarios d'aménagement, en regard des conditions d'utilisation du modèle. D'autre part, le schéma conceptuel est traduit en un modèle de simulation, qui est construit via la plateforme Stella. Quatre scénarios d'aménagement à l'horizon 2050 sont élaborés. Leur conception s'appuie à la fois sur le modèle de simulation et la revue de la littérature.

Finalement, la simulation des scénarios est lancée. Les résultats obtenus sous forme de graphiques et de tableaux sur une échelle de temps de 40 ans (2011-2050) sont alors analysés.

2.2.2 Étude de cas de la CMM: description du territoire de l'étude

La CMM a été constituée le 1^{er} janvier 2001 dans le but de favoriser la coordination, le financement et la planification, notamment l'aménagement territorial de la grande région de Montréal (MAMR, 2005; CMM, 2005, 2012b, 2014b). Elle regroupe 82 municipalités dont douze municipalités régionales de comté et cinq régions administratives (Figure 2.2). Parmi ces dernières, trois ne font que partiellement partie de la CMM: la Montérégie, les Laurentides et Lanaudière (CMM, 2014c, 2015b). Ces municipalités sont réparties en cinq secteurs géographiques: les agglomérations de Montréal, de Longueuil et de Laval, et les Couronnes Nord et Sud (CMM, 2010b, 2014c). À l'échelle des régions métropolitaines, le territoire de la CMM est la deuxième région métropolitaine en importance au Canada (CMM,

2014a). Il est aussi considéré comme un centre socio-économique majeur du Québec (MAMR, 2007; CMM, 2014a). En 2007, les activités et la population se concentraient principalement dans les agglomérations de Montréal, de Longueuil et de Laval (MAMR, 2007; CMM, 2011b). Cependant, sur les dix dernières années, les Couronnes Nord et Sud deviennent des secteurs de plus en plus denses en termes sociodémographiques. Cette tendance est observable dans les Laurentides, la MRC de Mirabel ou encore dans Lanaudière (CMM, 2011b; Saint-Amour, Charbonneau et André, 2015).

En 2014, la CMM compte environ 3,8 millions d'habitants, soit environ 50% de la population du Québec, pour une superficie totale de 4 364km² (CMM, 2014a, 2014b, 2015b). Le territoire est traversé par 1 800km de berges associées à un milieu aquatique de 525km² (12,0%), incluant 210km² (4,8%) de milieux humides (Allaire, 2013; CMM, 2010d, 2014a). Il couvre ainsi plusieurs plans d'eau: le fleuve Saint-Laurent, les rives de Beauharnois et de Pointe-des-Cascades à Contrecoeur et à Saint-Sulpice, les rives de la rivière Richelieu, de Carignan et de Richelieu à Beloeil et à Mont-Saint-Hilaire; les rivières des Prairies et des Mille-Îles, les lacs Saint-Louis et Deux-Montagnes, et l'embouchure de la rivière des Outaouais (CMM, 2010d, 2011a). Le milieu terrestre, quant à lui, couvre 3 839km² (88,0%) de la surface totale du territoire, incluant 2 205km² de terres agricoles (58%), des milieux naturels (couverts forestiers et espaces boisés) et urbains (Allaire, 2013; CMM, 2010c, 2013a, 2014a).

La Communauté exerce ses compétences dans les domaines suivants: l'aménagement du territoire, le transport (réseau artériel et transport en commun), les développements économique et culturel, l'environnement (ex.: espaces verts et bleus, assainissement de l'atmosphère et des eaux, gestion des matières résiduelles), le logement social, ainsi que les équipements, les infrastructures, les services et les activités de type métropolitain (CMM, 2013b, 2014a).

En vertu de la *Loi sur la Communauté métropolitaine de Montréal*, la CMM est sous la régie d'un conseil de 28 élus représentant les différentes municipalités du territoire. Le maire de Montréal est le président du conseil et du comité exécutif de la CMM (CMM, 2012b, 2014c). Ainsi, le conseil est constitué comme suit (CMM, 2013b, 2014a):

- le maire de la Ville de Montréal et treize personnes représentant la ville et l'agglomération de Montréal;
- le maire de la Ville de Laval et deux autres personnes;
- le maire de la Ville de Longueuil et deux personnes représentant la ville et l'agglomération de Longueuil;
- quatre maires sont désignés par les MRC comprises dans la CMM et la Couronne Nord (Ville de Mirabel et Deux-Montagnes, Thérèse-De-Blainville, Des Moulins, L'Assomption);
- quatre maires sont désignés par les MRC comprises dans la CMM et la Couronne Sud (Roussillon, Marguerite-D'Youville, La Vallée-du-Richelieu et Rouville, Beauharnois-Salaberry et Vaudreuil-Soulanges).

Ainsi, la CMM est en mesure d'agir, tant sur l'ensemble du territoire qu'à l'échelle des secteurs géographiques la constituant (CMM, 2015d).

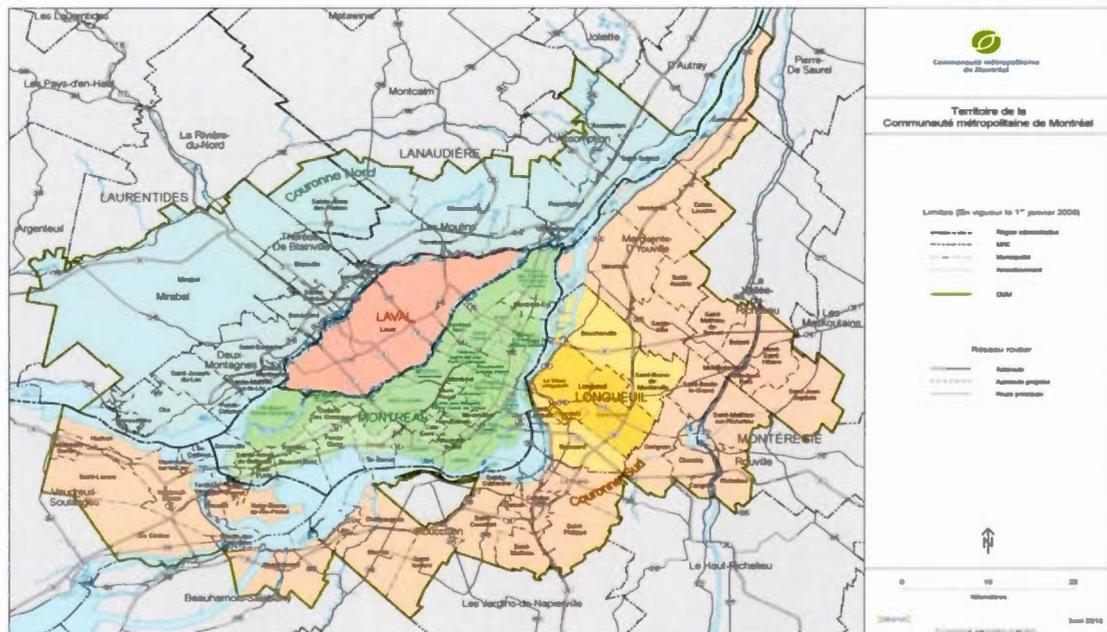


Figure 2.2 Carte générale du territoire de la CMM (Source: CMM, 2015a)

2.3 Atteinte du premier objectif secondaire: critères et indicateurs

2.3.1 Collecte des données: analyse de la littérature sur les plans d'ACC

Une littérature spécifique sur la formation et l'amplification des ICU, liée aux plans d'ACC aux niveaux national et local est analysée (Breen, 2008; Greene et Robichaud, 2010; BNQ, 2013). Cette analyse s'accompagne de celle de la documentation relative à la CMM et à ses domaines d'actions (www.cmm.qc.ca), et de celle des publications gouvernementales (MAMM, 2001; MAMR, 2005; CMM, 2005, 2010a, 2012a, 2012b, 2014b, 2015d).

L'approche adoptée pour l'intégration du problème des ICU dans les plans urbains d'ACC est de minimiser leurs impacts à plus ou moins long terme. La structuration des impacts est réalisée selon la démarche d'évaluation des impacts sur l'environnement (voir Annexe B) (Côté, Waub et Mareschal, 2015). Cette démarche est centrée sur la structuration des informations selon les enjeux, les sources de

changement, les composantes stratégiques touchées, et les impacts. Dans ce mémoire, elle est appliquée à la prise en compte des enjeux liés aux ICU dans les plans d'ACC, plus particulièrement l'impact de détérioration de la santé publique relié à l'enjeu de santé publique pour le plan d'ACC de la CMM. Le tableau 2.1 illustre cette structuration.

Tableau 2.1 Structuration des impacts par enjeu selon la démarche d'ÉIE: enjeu de santé publique (Source: Côté, Waaub et Mareschal, 2015)

| Enjeu | Sources de changement | Composantes | Impact |
|----------------|--------------------------|---|------------------------------------|
| Santé publique | Ilôts de chaleur urbains | <ul style="list-style-type: none"> • Environnementale • Économique • Territoriale • Sociale | Détérioration de la santé publique |

La littérature est également une source d'informations nous permettant de documenter les critères et les indicateurs d'évaluation des impacts liés aux ICU, en termes de pertinence et de cohérence, en regard de la planification de l'ACC des villes. Un critère correspond à un point de vue observable décrivant ou mesurant une réalité, et il est ensuite estimé par un indicateur (Gérard, 2010; Stics, 2014). Ce dernier correspond à une mesure qualitative ou quantitative d'un critère, qui se doit d'être le plus spécifique possible (ERSP, 2009; Stics, 2014). Par ailleurs, les critères et les indicateurs d'évaluation des impacts des ICU sont associés à des domaines et des secteurs d'activités figurant dans les plans d'adaptation, comme par exemple le climat, les émissions de GES, les ressources naturelles, l'énergie ou encore la sociodémographie (Bovar *et al.*, 2008; Lavaud et ARPE-Midi-Pyrénées, 2011; CGDD, 2012; CMM, 2014b).

Selon Merenne-Schoumaker (1990), plusieurs domaines et secteurs d'activités sont spécifiques à certaines villes et ne se sont pas nécessairement retrouvés dans tous les

plans d'actions pour l'ACC. Il en est ainsi avec la biodiversité et l'agriculture. Leur spécificité est associée au lieu géographique de la ville, avec ou sans périphérie rurale et/ou urbaine. Dans le cadre de cette recherche, les critères ont été définis selon les domaines et secteurs d'activités communs aux plans d'adaptation relatifs aux ICU, soit la température, les émissions de GES, les logements, l'énergie, les environnements bâti et naturel, la démographie, la santé publique, la pollution atmosphérique et le transport routier.

Toutefois, les activités économiques ont été éliminées de l'étude, car elles prenaient en compte un trop grand nombre de paramètres difficiles à intégrer dans le modèle de simulation. Elles complexifieraient le travail à fournir, ce qui allait au-delà de la portée de cette recherche. Notons que si les activités économiques avaient été intégrées au modèle, les résultats auraient pu servir de guide dans les décisions politiques en termes de budgets financiers, amenant à évaluer ce qui doit être effectué en priorité dans les années futures. Les plans urbains d'ACC incluent aussi les précipitations qui ne sont pas prises en compte dans ce travail. Les ICU sont davantage reliés à la température plutôt qu'aux précipitations. Finalement, l'agriculture a également été exclue des analyses, même si sur le territoire de la CMM, elle correspondait à 58% de la superficie terrestre totale du territoire (CMM, 2014a).

Suite à ces simplifications, les limites méthodologiques identifiées sont:

- la disponibilité des données: certaines données n'existaient pas et d'autres étaient difficiles à trouver ou à obtenir;
- le processus itératif de mise à jour du tableau d'évaluation des impacts des ICU: certains critères et indicateurs ont été rectifiés plusieurs fois et d'autres ont été exclus (activités économiques, précipitations, agriculture);
- la réalisation du modèle: il a été difficile de satisfaire quelques contraintes statistiques liées à la validation des données recueillies pour la modélisation;

- le temps imposé pour réaliser cette étude.

2.3.2 Représentation du processus de formation et d'amplification des ICU

Dans le but de mieux comprendre le phénomène des ICU à l'échelle des villes, la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU est décrite ci-dessous. Le schéma conceptuel simplifié qui en a été déduit est, quant à lui, expliqué à la section 3.2.2 (voir Figure 3.1).

L'apparition et les effets des ICU sont influencés à la fois aux échelles globale, par le réchauffement climatique, et locale par l'intensification des fortes chaleurs. À l'échelle des villes, deux types d'effets sont observables. D'une part, les effets de réduction se caractérisent par les espaces bleus et verts. Ils offrent des espaces de rafraîchissement par diminution de la température de l'air (Baudouin et Cavayas, 2008; Fernandez et Deshaies, 2011; Nature Québec, 2014), ainsi qu'une réduction des émissions de GES et une amélioration de la qualité de l'air (Anquez et Herlem, 2011). D'autre part, les effets d'augmentation proviennent d'une forte minéralisation urbaine (Anquez et Herlem, 2011; BNQ, 2013) et un environnement bâti dense, accompagnée d'une densité de population à la hausse (Apparicio, Séguin et Leloup, 2007; Perspective Grand Montréal, 2013). Cette dernière est associée au besoin croissant de logement résidentiel et de transport (AMT *et al.*, 2008; Bigras, 2010; STM, 2011). Il en résulte des conséquences sur l'environnement et la santé humaine. En premier lieu, l'utilisation de la climatisation (IAU ÎdF, 2010a; Anquez et Herlem, 2011) et de l'électricité (AECOM Tecslut Inc., 2012; Harvey, 2012; Pineau, 2013) favorisent les rejets d'émissions de GES dans l'atmosphère⁷ et affectent le réchauffement climatique aux échelles mondiale et locale (Houle, 2009; IAU ÎdF, 2010a). En deuxième lieu, la population devient vulnérable aux ICU, fait marqué par une hausse

⁷ Toutes les sources d'énergie entraînent des émissions à différents niveaux (CMM, 2010; Waaub, 2013).

des taux de mortalité et de morbidité (Tairou, Bélanger et Gosselin, 2010; Lebel, Bustinza et Gosselin, 2011; Perspective Grand Montréal, 2012). Certains individus sont d'ailleurs plus exposés aux risques liés aux changements climatiques que d'autres (Tairou, Bélanger et Gosselin, 2010; Roy *et al.*, 2011). La vulnérabilité des personnes est exacerbée par la densification des villes et la minéralisation des infrastructures, auxquelles peuvent s'ajouter de mauvaises conditions de vie (Fernandez et Deshaies, 2011; Lareau Carpentier, 2012).

2.4 Atteinte du deuxième objectif secondaire: illustration de l'apport de la modélisation pour réduire les ICU sur le territoire de la CMM à l'horizon 2050

2.4.1 Choix d'une approche de modélisation: simulation avec la plateforme Stella

L'outil de modélisation Stella est axé sur la théorie de la dynamique des systèmes énoncée en 1971 par Jay W. Forrester, professeur à l'Institut de technologie du Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology* ou MIT). Puis, le Club de Rome composé des étudiants du professeur l'améliore (de Rosnay, 1975; Boulanger et Bréchet, 2003). Forrester met en œuvre les dynamiques industrielle et urbaine (1961) axées sur la simulation et la prévision du comportement des entreprises, ainsi que de la croissance et de la dégénérescence des villes (de Rosnay, 1975).

Aujourd'hui, Stella fait partie d'un ensemble d'outils de modélisation dynamique associés à un système collaboratif appelé « Systems Thinking ». Il est généralement utilisé par les universités, les services gouvernementaux, etc. (Malone *et al.*, 2009; ISEE Systems, 2013). Stella est une plateforme versatile et selon nous, appropriée au cadre de cette recherche.

Par ailleurs, cet outil tente de représenter de façon détaillée toutes les transformations et les changements possibles et plausibles (Malone *et al.*, 2009; ISEE Systems, 2013). Ces dernières évoluent selon des conditions (valeurs des paramètres) différentes pour

des variables-clés identiques, dans un horizon temporel fixé, ici l'horizon 2050 (Ferrari et Point, 2003; ISEE Systems, 2013). Stella met également en évidence les opportunités ou les états les plus favorables d'un système, afin d'observer ce qui pourrait arriver dans le futur. Il nous prodigue ainsi de nouvelles connaissances scientifiques, en représentant des évolutions possibles d'un seul système et ce, à long terme (Ferrari et Point, 2003; ISEE Systems, 2013).

D'un point de vue technique, le fonctionnement de l'outil Stella repose sur le principe d'interaction entre les flux et les stocks combinés à des boucles de rétroaction (*feedbacks loops*) reliées au système étudié (Figure 2.3) (de Rosnay, 1975; Gacogne, 2003-2014). Les stocks sont comme des réservoirs alimentés par des flux d'entrées (données ou *inputs*) et de sorties (résultats ou *outputs*). Ainsi, les entrées correspondent à l'influence de l'environnement et les sorties aux actions du système étudié sur l'environnement (de Rosnay, 1975; Boulanger et Bréchet, 2003).

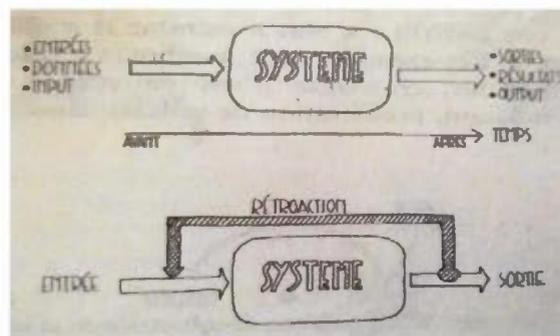


Figure 2.3 Schématisation de la dynamique des systèmes: relations entre les boucles de rétroaction, les flux et les réservoirs (Tiré de de Rosnay, 1975, p. 99)

Ces rétroactions correspondent à des effets cumulatifs croissants (explosion) ou décroissants (blocage ou arrêt de toute activité), marquant les divergences. On parle alors de rétroactions positives (*positive feedback*) (Figure 2.4). Il y a aussi des rétroactions régulatrices ou stabilisatrices venant contrebalancer les positives, amenant le système à un état d'équilibre ou à un état stable vers une finalité

(Figure 2.5). Il s'agit de rétroactions négatives (*negative feedback*) (de Rosnay, 1975; Gacogne, 2003-2014; Kunsch, 2014).

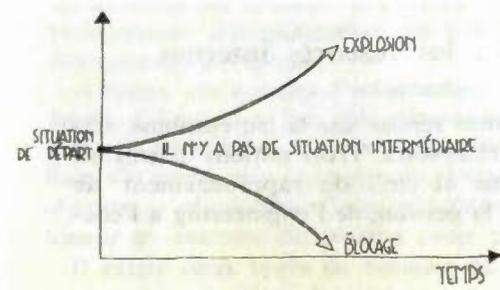


Figure 2.4 Graphique illustrant une boucle de rétroaction positive ou explosive: comportement divergent croissant (Tiré de de Rosnay, 1975, p. 100)

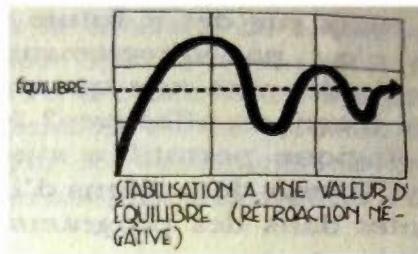


Figure 2.5 Schéma de modélisation et représentation graphique d'une boucle de rétroaction négative ou régulatrice: comportement convergent vers un but (Tiré de de Rosnay, 1975, p. 101)

En dynamique des systèmes, la temporalité assure la visualisation de ce qui pourrait se produire avant et après, entre le passé et le présent (de Rosnay, 1975). Elle amène à réfléchir sur la compréhension du système étudié et sur la façon dont interagit un phénomène (de Rosnay, 1975; Gacogne, 2007; Riguelle, 2009).

2.4.2 Validation des conditions d'utilisation du modèle

2.4.2.1 Collecte de données pour la modélisation

Répertoriées dans une base de données (voir Annexe A), la collecte de données pour la modélisation est orientée en fonction des quatre tableaux de critères et

d'indicateurs d'évaluation des impacts des ICU (voir section 3.2.1). Il en résulte vingt-deux types de données à récolter (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Compilation des types de données à récolter

| Catégories de données | Types de données |
|-----------------------|---|
| Environnementales | <ul style="list-style-type: none"> - Température de surface (ICU) et de l'air - Albédo, morphologie des bâtiments, surfaces imperméables - Émissions de GES - Indice de la qualité de l'air (pollution atmosphérique) |
| Économiques | <ul style="list-style-type: none"> - Type et le mode de transport - Consommation énergétique - Flux de chaleur du métabolisme - Flux de chaleur du trafic routier |
| Territoriales | <ul style="list-style-type: none"> - Indice de végétation par différence normalisée - Indice de bâti par différence normalisée - Type de logement - Mode d'occupation |
| Sociales | <ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'habitants - Densité et âge de la population - Indice de défavorisation - Facteurs de risque à la santé mentale - Facteurs de risque d'exposition aux fortes chaleurs |

À l'échelle des municipalités de la CMM, la température de surface (ICU), les indices de densité de la végétation (NDVI ou *Normalized Difference Vegetation Index*) et de la densité de l'environnement bâti (NDBI ou *Normalized Difference Build-up Index*)⁸ ont été fournies par Yves Baudouin, directeur du Collectif de recherche sur les Îlots de chaleur et professeur au département de géographie de l'UQÀM (Baudouin, 2014).

⁸ NDVI et NDBI varient de -1 (absence de couverture végétale ou de minéralisation) à +1 (couverture végétale très dense ou forte présence de minéralisation) (Baudouin *et al.*, 2011).

Les données de la température de surface, du NDVI et du NDBI ont été collectées le 14 juillet 2011 pour chaque municipalité. Quant aux données des températures quotidiennes minimales et maximales de l'air, elles sont issues des stations d'observation d'Environnement Canada⁹, pour la période du 01 juin à 31 août 2011 sur le territoire de la CMM. Elles étaient plus disponibles d'accès, contrairement à celles de la température de surface. En effet, ces dernières sont mesurées pour une seule journée ou une courte période, généralement présentes sous format cartographique. Il a donc paru plus consciencieux d'utiliser les données de la température de l'air sur le site d'Environnement Canada.

Les autres données environnementales proviennent de trois sources différentes à l'échelle de la CMM. Celles liées aux caractéristiques des ICU (albédo, morphologie des bâtiments, etc.) sont répertoriées dans l'étude de Merahi (2014). Les émissions de GES proviennent de l'Observatoire du Grand Montréal¹⁰. La majorité des données sociales (excepté les facteurs de risque), territoriales (logement) et économiques (transport) proviennent de Statistique Canada (recensements de 2006 et 2011). De plus, celles sur le logement, les émissions de GES et le transport ont été complétées par la documentation (AMT *et al.*, 2008; CMM, 2010a, 2010b, 2012a, 2012b; Ville de Montréal, 2013).

Ensuite, l'indice de la qualité de l'air (IQA), indicateur de la pollution atmosphérique, provient de deux sources. La première correspond au site du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de Lutte contre les changements climatiques du Québec¹¹. Les données sont mesurées en fonction du nombre de jours et des régions, définissant l'IQA comme bon, acceptable et mauvais. Pour ce travail, les données ont été sélectionnées par région administrative (Montréal, Laval, la

⁹ Voir sur <http://climat.meteo.gc.ca/>.

¹⁰ Voir sur <http://observatoire.cmm.qc.ca/swf/index.php>.

¹¹ Voir sur <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/air/iqa/statistiques/index.htm>.

Montréal, Lanaudière et des Laurentides) pour l'année 2011. La deuxième source est la Ville de Montréal; son site Internet de réseau et de suivi donne accès au public aux données sur la qualité de l'air¹². Cependant, la zone échantillonnée porte uniquement sur l'agglomération de Montréal et la Ville de Montréal pour des données quotidiennes de juin à août 2011. L'échantillonnage dépend de la localisation des stations de surveillance de la qualité de l'air.

Parmi les données économiques, celles liées à la consommation d'énergie ont été obtenues sur le site de l'Office de l'efficacité énergétique. Celui-ci ne fournit des données qu'aux échelles nationales et provinciales. Pour la période 2009-2012, celles-ci ont été converties à l'échelle du territoire de la CMM à l'aide de données démographiques (Plouhinec, 2014). Notons que les informations ont été répertoriées à partir de sources externes: Statistique Canada, Environnement Canada, Ressources naturelles Canada, Hydro-Québec, Informetrica Limited, l'Association canadienne des gros fabricants en appareils ménagers (ACFGAM), le Centre de données et d'analyse de la consommation finale d'énergie dans l'industrie, et Transports Canada¹³.

Enfin, les facteurs de risque à la santé mentale et à la sensibilité à l'exposition aux fortes chaleurs (données sociales) découlent de la littérature. Les données les plus récentes, à notre connaissance, datent de 2007 pour une étude réalisée aux États-Unis (Bouchama *et al.*, 2007) et de 2010 pour deux études effectuées à Montréal (Tairou, Bélanger et Gosselin, 2010; Roy *et al.*, 2011).

¹² Voir sur

http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,74495616&_dad=portal&_schema=PORTAL.

¹³ Voir sur http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/tableaux_complets/liste.cfm?attr=0.

2.4.2.2 Validation des conditions d'utilisation des données pour la plateforme Stella

Après avoir collecté les données, il est nécessaire de les valider statistiquement avant de procéder à la construction du modèle de simulation et à la production des scénarios d'aménagement. La validation des conditions d'utilisation des données est réalisée à l'aide de la plateforme statistique John's Macintosh Project (JMP).

Une première phase a été d'établir la relation entre les données collectées à l'aide de la littérature. Elle consiste à déterminer le degré d'importance des données les unes par rapport aux autres dans le cadre des ICU en milieu urbain, améliorant la précision de l'évolution des scénarios d'aménagement. Une deuxième phase a été d'effectuer des tests d'analyse en composantes principales (ACP) dans le but de vérifier l'existence de corrélations (seuil de corrélations entre 0,2 et 0,8). La corrélation est synonyme de redondance de l'information en statistique, ce qui est à éviter (Paquet, 2014; Plouhinec, 2014). Toutefois, deux postulats sur trois de l'ACP n'ont pas été respectés, induisant des tests statistiques qui seront probablement erronés. Ce pourquoi, afin de pallier à cet handicap, certaines données ont été éliminées, réduisant le nombre total de données valides à trois sur vingt-et-deux. Il s'agit là de la plus grande limite actuelle du projet (voir section 3.3.1). La température de surface, le NDBI et le NDVI sont alors les seules données employées lors de l'élaboration du modèle de simulation et de la conception des scénarios d'aménagement.

De plus, une autre série de tests statistiques est effectuée afin de calibrer le modèle de simulation. Ces tests ont pour but de comparer la température de l'air des secteurs géographiques de la CMM entre eux et avec ceux hors CMM pour identifier une température de référence. Cette dernière servira à mettre en évidence les ICU dans la CMM. Un pas de temps est également fixé pour établir la période d'évolution des scénarios d'aménagement, soit du 01 juin au 31 août 2011. L'outil de modélisation

Stella est alors en mesure de générer des scénarios d'aménagement en jours et en années.

2.4.3 Conception des scénarios d'aménagement à l'horizon 2050

Quatre scénarios d'aménagement ont été élaborés à l'échelle de la CMM sur une période de 40 ans (2011-2050). Chaque scénario diffère par des hypothèses établies à l'aide de la littérature: un scénario de base et trois scénarios hypothétiques. Leur conception informatique repose sur le modèle de simulation via la plateforme Stella.

Le premier scénario correspond à l'absence de mise en œuvre de plan d'actions, de stratégies et de politiques. Il repose sur l'évolution de la tendance actuelle de la densité de l'environnement bâti (NDBI) comme facteur de risque de formation des ICU, et celle de la couverture végétale (NDVI) comme celui la réduisant. Il correspondra au scénario de base ou *business as usual* (BAU).

La conception des deuxième et troisième scénarios repose sur le « Plan d'action canopée 2012-2021 » de la Ville de Montréal, qui est un projet pilote appliqué dans l'agglomération de Montréal, la Ville de Montréal et les villes liées y participant. L'objectif de ce projet est d'augmenter l'indice de canopée de 20 à 25% de l'Île de Montréal sur une période de 10 ans, avec la collaboration des villes liées et des arrondissements de l'agglomération de Montréal (DGPV, 2012). Gagnon *et al.* (2010) et Leduc-Frenette (2012) rapportent qu'atteindre un tel objectif reviendrait à une hausse de 10% de cet indice pour chaque arrondissement de l'Île de Montréal.

Le deuxième scénario est axé sur une augmentation de la densité de la couverture végétale (NDVI) de 10% par municipalité de la CMM. La densité de l'environnement bâti ne connaît pas de changement et évolue selon la tendance actuelle. Le troisième scénario se caractérise par une diminution de 5% en 10 ans de la densité de

l'environnement bâti. Ici, les paramètres à tenir compte sont la croissance démographique (CMM, 2005, 2011a, 2013a), la demande de logements (Apparicio, Séguin et Leloup, 2007; Perspective Grand Montréal, 2013; Nature Québec, 2014) et les mesures de lutte contre les ICU (ex.: murs et toits végétalisés, création d'îlots de fraîcheur) (Chan *et al.*, 2007; Trottier, 2007; Fernandez et Deshaies, 2011; Boulfroy *et al.*, 2013), ainsi que les pratiques d'aménagement urbain réductrices du taux de minéralisation (ex.: matériaux de construction perméables, toitures ou peintures réfléchissantes) (Deny *et al.*, 2007; Deny *et al.*, 2008; Rullier, 2012; CMM, 2011c, 2013a). De nos jours, il existe un grand nombre de mesures de lutte aux ICU. Pourtant, réduire le taux de minéralisation dans les villes est actuellement difficile (IAU ÎdF, 2010a). Les obstacles actuels sont: le rapport qualité/prix des moyens et des ressources techniques et humaines, ainsi que le temps de préparation et d'avancement du projet ou du plan de mesures de lutte face aux ICU.

Enfin, le quatrième scénario correspond à la combinaison des scénarios 2 et 3, soit à la fois une augmentation de 10% de la végétation et une diminution de 5% de la densité de l'environnement bâti en 10 ans.

2.4.4 Simulation des scénarios d'aménagement à l'horizon 2050

2.4.4.1 Consolidation et calibration du modèle: pré-traitements

2.4.4.1.1 Température de référence

Pour pouvoir effectuer la simulation des scénarios d'aménagement, le modèle de simulation Stella doit être correctement configuré et calibré. L'élément central étant les ICU, ces derniers sont conceptualisés en se basant sur leur définition. Ceci signifie qu'à l'échelle du territoire métropolitain montréalais, les deux zones sont la CMM et sa zone extérieure. En ce sens, une température de référence est nécessaire, servant de repère au logiciel Stella, afin de déterminer les ICU et leur évolution sur le territoire de la CMM.

Dans un premier temps, une série de stations d'observation de la température de l'air est sélectionnée. La CMM est représentée par douze stations d'observation et la zone extérieure par huit autres (Figure 2.6).



Figure 2.6 Images satellitaires de Google Earth: localisation des stations d'observations (punaises jaunes) dans et hors du territoire de la CMM et sa délimitation

Le nombre de stations d'observation varie selon les secteurs géographiques. Notons que pour la zone extérieure de la CMM, les stations sélectionnées se situent entre 5 et 25 km de diamètre des limites du territoire de la CMM (Tableau 2.3).

Dans un deuxième temps, les températures moyennes de l'air de la CMM et de sa zone extérieure sont soumises à des tests de corrélation. Ces derniers mettent en évidence les similarités entre ces températures alors que, le test de covariance par régression linéaire simple permet d'identifier les différences. Ainsi, l'ensemble de ces tests servent à identifier une température de référence dans la modélisation des scénarios. Il s'agit de la température moyenne de l'air de HS S (voir Annexe B).

Tableau 2.3 Répertoire des stations d'observation caractérisant les secteurs à l'étude (Source: Environnement Canada, <http://climat.meteo.gc.ca>)

| Numéro du secteur | Secteurs géographiques | Stations météorologiques |
|-------------------|----------------------------|--|
| S1 | Laval | Auteuil |
| S2 | Agglomération de Longueuil | Montréal/Saint-Hubert |
| S3 | Agglomération de Montréal | Sainte-Geneviève, McTavish, Sainte-Anne-de-Bellevue, |
| S4 | Couronne Nord | Oka, l'Assomption |
| S5 | Couronne Sud | Varenes, Les Cèdres, Saint-Amable, La Prairie, Verchères |
| HS N | Hors secteur nord | Rigaud, Lachute, Saint-Jacques, Saint-Hippolyte |
| HS S | Hors secteur sud | Valleyfield, l'Acadie, Sainte-Madeleine, Ormstown |

2.4.4.1.2 Équation de régression

La régression est une méthode statistique qui exprime la relation entre deux ou plusieurs variables, qui décrit la forme de cette relation, et qui permet de prévoir les variations d'une variable y en fonction d'une (régression linéaire) ou plusieurs variables x (régression multiple) (Scherrer, 1984; Borcard, 2008). Pour cette étude, la régression linéaire simple est appliquée et se résume par une équation mathématique du type (Borcard, 2008, p. 2):

$$y_i = b_0 + b_1x$$

L'équation de régression a servi à calibrer le modèle de simulation. Elle est déterminée à l'aide d'un test de covariance par régression linéaire simple. Elle exprime la relation entre la température de la CMM, le NDVI, le NDBI et la température de surface (ICU) des municipalités et de l'air (température de référence). Le modèle de simulation peut alors être calibré pour un pas de temps de trois mois (juin, juillet, août) à l'échelle de la CMM de 2011 à 2050 sous le logiciel Stella. L'équation de régression confirme d'ailleurs la relation de NDVI et de NDBI aux ICU définis par la température de surface des municipalités, et fournit leur forme mathématique sous Stella (voir Annexe B).

2.4.4.2 Simulation des scénarios d'aménagement à l'horizon 2050: traitement

Après avoir construit le modèle de simulation sous logiciel Stella, toutes les données y sont insérées, ainsi que l'équation de régression. Pour le scénario de base, les données originales des indices sont conservées tandis que pour les trois autres, elles sont estimées selon les hypothèses établies. Puis, la simulation débute (*run*). Notons qu'aucune analyse de sensibilité n'a été effectuée.

Bien que le logiciel Stella soit facile à utiliser, efficace et flexible, il reste complexe mathématiquement. La principale difficulté rencontrée est la mise en équations mathématiques du modèle (formalisation des relations entre les variables).

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats sont présentés en trois grandes sections:

- L'analyse de la littérature sur les plans d'ACC et la proposition d'un schéma conceptuel de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU;
- La validation des conditions d'utilisation du modèle et la révision du schéma conceptuel de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU;
- La simulation des scénarios et les limites rencontrées.

3.2 Analyse de la littérature sur les plans d'ACC et proposition d'un schéma conceptuel simplifié de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU

3.2.1 Analyse de la littérature sur les plans d'ACC

L'application de notre grille d'analyse de la littérature conduit à retenir dix critères et vingt-et-deux indicateurs qui sont définis et catégorisés en fonction de quatre composantes d'évaluation des impacts des ICU. Ces critères et ces indicateurs sont répertoriés en quatre tableaux. Le premier tableau (Tableau 3.1), référant à la composante environnementale, comprend quatre critères: le climat, les ICU, les émissions de GES et la pollution (CMM, 2010b; Greene et Robichaud, 2010; MÉDDTL, 2011). La documentation sur les plans d'ACC porte sur les précipitations et la température de l'air où seule cette dernière est caractéristique des ICU à hauteur de 32,1m (BNQ, 2013; Baudouin, 2014). Par ailleurs, les ICU sont également liés aux émissions de GES. D'une part, les fortes chaleurs induisent une consommation en énergie plus élevée et donc, une forte concentration de rejets de chaleur (Lachance, Baudouin et Guay, 2006; Houle,

2009). D'autre part, elles correspondent à une manifestation directe du réchauffement climatique mondial (GIEC, 2007; Martin, 2008) qui participe de façon indirecte à la formation des ICU. Les documents de référence rapportent aussi que les ICU participent à la pollution de l'air et à la formation de smog en ville, affectant la qualité de l'air et la santé de la population (IAU ÎdF, 2010a; Anquez et Herlem, 2011; Lareau Carpentier, 2012).

Tableau 3.1 Critères et indicateurs d'évaluation des impacts des îlots de chaleur urbains: composante environnementale

| CRITÈRES | INDICATEURS |
|---|--|
| 1.1 Conditions climatiques locales | Température de l'air (à minimiser) |
| 1.2 Conditions climatiques de l'espace urbain | Température de surface (à minimiser) |
| 1.3 Contribution de la CMM aux émissions de GES | Taux d'émissions totales (à minimiser) |
| | Taux d'émissions par secteur d'activités (à minimiser) |
| 1.4 Qualité de l'air | Taux de pollution atmosphérique (ozone, particules fines, dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, monoxyde de carbone) (à minimiser) |

Le deuxième tableau porte sur la composante économique des villes (Tableau 3.2), soit les coûts relatifs aux données sociodémographiques relatives aux ICU. Les activités anthropiques liées au transport et à l'énergie ont une influence sur la formation et l'amplification des ICU (IAU ÎdF, 2010a; Ercoskun, 2012; Ecologic Institute *et al.*, 2013). La présence de ces derniers entraîne un changement de comportement chez les individus, les incitant à utiliser la climatisation et à consommer plus d'énergie. Ce phénomène entraîne voire accentue les impacts sur l'environnement et sur la santé de la population (Anquez et Herlem, 2011; Lareau Carpentier, 2012; Merahi, 2014). Finalement, les flux de chaleur, constamment présents dans les villes, correspondent à la transmission de chaleur à partir d'un corps quelconque pendant un intervalle de temps

(Université Joseph Fourier, 2014). Influencés par la morphologie urbaine (Merahi, 2014), les flux de chaleur liés au métabolisme et au trafic routier sont considérés.

Tableau 3.2 Critères et indicateurs d'évaluation des impacts des îlots de chaleur urbains: composante économique

| CRITÈRES | INDICATEURS |
|--------------------------------|--|
| 2.1 Réseau de transport urbain | Taux de déplacements par mode de transports (à minimiser) |
| | Densité du réseau de transport routier (à minimiser) |
| | Quantité de véhicules actifs sur le territoire (à minimiser) |
| 2.2 Énergie | Consommation totale d'énergie du transport routier (à minimiser) |
| | Consommation d'énergie par secteurs d'activités (résidence, industrie) (à minimiser) |
| | Flux de chaleur du trafic routier (à minimiser) |
| | Flux de chaleur du métabolisme (à minimiser) |

Le troisième tableau concerne la composante territoriale (Tableau 3.3). Les critères d'évaluation des impacts des ICU sont l'aménagement urbain et les conditions physiques de l'espace urbain. L'aménagement urbain fait référence aux plans et aux pratiques mis en œuvre afin de réduire les ICU, comme par exemple le verdissement ou l'utilisation de matériaux perméables (Baudouin et Cavayas, 2008; Fernandez et Deshaies, 2011; Nature Québec, 2014). La végétation et les espaces bleus sont favorables à la réduction des ICU, des émissions de GES et de la pollution de l'air, contrairement à l'environnement bâti (Martin, 2008; IAU ÎdF, 2010a, 2010b; ICIS, 2011).

Tableau 3.3 Critères et indicateurs d'évaluation des impacts des îlots de chaleur urbains: composante territoriale

| CRITÈRES | INDICATEURS |
|---|--|
| 3.1 Aménagement urbain | Densité des espaces verts (NDVI) (à maximiser) |
| | Densité de l'environnement bâti (NDBI) (à minimiser) |
| | Pourcentage de la superficie des logements de différents types (à minimiser) |
| 3.2 Conditions physiques de l'espace urbain | Géométrie urbaine, exprimé par le rapport d'aspect H/W (à optimiser) |
| | Indice de minéralisation des surfaces urbaines (à minimiser) |
| | Niveau d'effet d'albédo de l'espace urbain (à maximiser) |

Enfin, le dernier tableau porte sur la composante sociale (Tableau 3.4), comprenant les critères de la démographie et de la vulnérabilité des populations aux ICU. Cette dernière est influencée par la combinaison des conditions de logements et démographiques. De mauvaises conditions de vie comme l'absence de fenêtres ou un appartement mal isolé amplifient la vulnérabilité des individus, mais aussi le phénomène des ICU. Par exemple, les ménages à revenu faible ou les personnes âgées font partie de la population vulnérable (Tairou, Bélanger et Gosselin, 2010; Roy *et al.*, 2011).

Tableau 3.4 Critères et indicateurs d'évaluation des impacts des flots de chaleur urbains: composante sociale

| CRITÈRES | INDICATEURS |
|---|--|
| 4.1 Démographie | Densité de la population du territoire (à minimiser) |
| 4.2 Vulnérabilité des populations aux ICU | Indice de défavorisation (à minimiser) |
| | Taux de personnes âgées (à minimiser) |
| | Taux de jeunes enfants (à minimiser) |

3.2.2 Proposition d'un schéma conceptuel simplifié de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU

La représentation du processus de formation et d'amplification des ICU est présenté sous forme de schéma conceptuel simplifié (Figure 3.1). Se référant à la revue de la littérature, les principaux facteurs d'influence liés aux ICU sont représentés. Leurs effets sont caractérisés d'une part, par le signe bleu \uparrow qui équivaut à une augmentation, et d'autre part, par le signe rouge \downarrow équivalent à une diminution. Le sens des flèches (\rightarrow) est lié à la relation entre les facteurs.

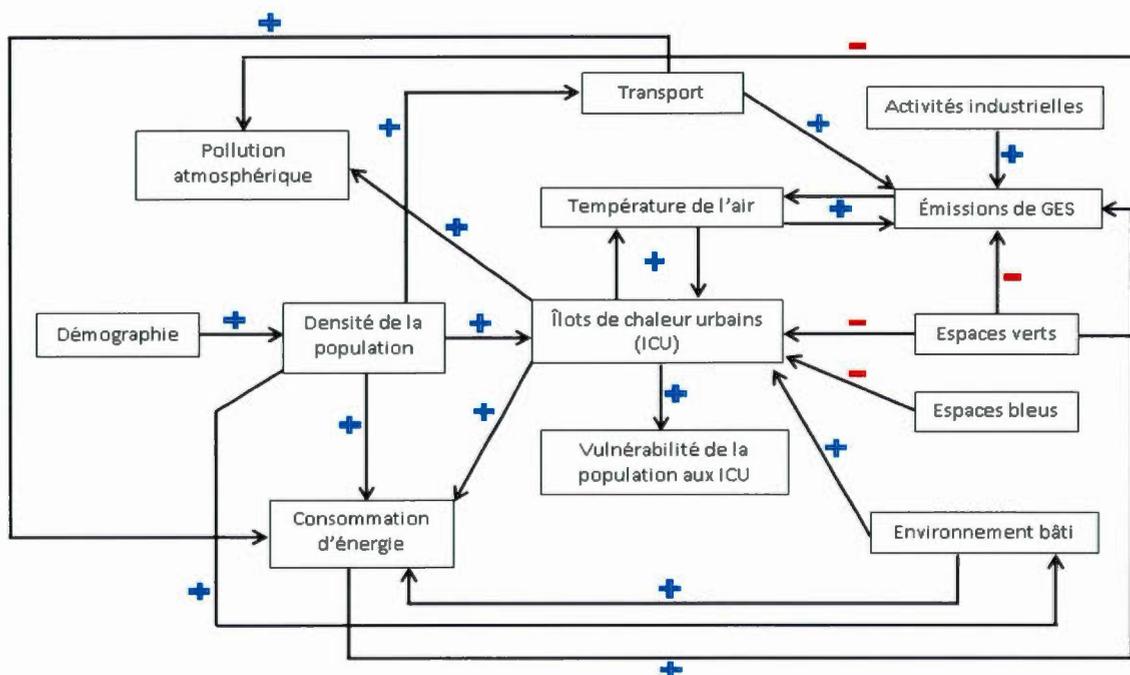


Figure 3.1 Schéma conceptuel simplifié de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU

3.3 Validation des conditions d'utilisation du modèle et révision du schéma conceptuel de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU

3.3.1 Tests de validation des conditions d'utilisation du modèle

En statistique, les postulats d'utilisation d'un test statistique sont à vérifier avant de réaliser toute analyse. L'un des postulats d'utilisation de base est que les variables aient une distribution suivant la loi normale (Paquet, 2014; Plouhinec, 2014). À ce stade-ci, les tests de validation des conditions d'utilisation des données ont démontré plusieurs incohérences. Premièrement, l'analyse des données révèle que les distributions ne sont pas normales, excepté pour la température de surface (ICU), le NDVI et le NDBI. Deuxièmement, les variables ne respectaient pas deux postulats d'utilisation statistique des ACP sur trois: une table de données non rectangulaire et des données non multivariées (Paquet, 2014). Une autre raison à la partialité des ACP est que les données collectées ne sont pas sous la même échelle: certaines étaient catégorisées selon les secteurs géographiques de la CMM (ex.: transport routier ou logement), tandis que d'autres par type de données. Donc, au lieu de vingt-deux données à intégrer à la

modélisation, seulement trois sont utilisées: la température de surface (ICU), le NDVI et le NDBI.

Par ailleurs, ces résultats ont notamment conduit à réviser le schéma conceptuel de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU. Il a été simplifié, réduit aux interactions entre la température, les espaces verts et l'environnement bâti.

3.2.2 Révision de la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU: modèle simplifié

La représentation du processus de formation et d'amplification des ICU est simplifiée suite aux résultats statistiques de validation des conditions d'utilisation des données (Figure 3.2, voir p. 65). Elle est directement construite sous logiciel Stella, intégrant tous les paramètres de modélisation.

Dans un premier temps, la température moyenne de l'air de la zone extérieure nord (HS N), soit la température de référence, est créée. Elle a une température moyenne de 2°C inférieure à celle de la CMM, alors que la température moyenne de la zone extérieure sud (HS S) est similaire à celle de la CMM (voir Annexe C). Pour un pas de temps de trois mois, ajustable en jours (3588 jours) et en années (2011 à 2050), HS N est liée à la température des municipalités.

Dans un deuxième temps, cette relation est associée à la température moyenne de la CMM, qui est construite par une moyenne pondérée. Un facteur correctif, qui correspond au pourcentage de la superficie de chaque municipalité, est ajouté au modèle. Il contribue à réduire le maximum d'erreurs et à obtenir un modèle le plus représentatif possible de la réalité.

Dans un troisième temps, le NDVI et le NDBI sont intégrés au modèle de simulation pour chaque scénario d'aménagement (0, 1, 2, 3). Ils sont reliés à la température de surface des municipalités. Le dernier paramètre créé est une figure « scénario » qui assure la

compilation de l'ensemble des scénarios dans un même modèle et le passage d'un scénario à l'autre.

Toutefois, lors de l'entrée des données dans le modèle, certaines municipalités avaient des NDBI négatifs (jusqu'à -0,17). Ils correspondent à des conditions non représentatives de l'ensemble du territoire de la CMM. Ainsi, les municipalités ayant une température inférieure à 14°C sont éliminées du modèle: l'île Bizard-Sainte-Geneviève, la baie d'Urfé, l'île Cadieux, l'île Dorval, Saint-Lazare, Mont-Saint-Hilaire, Léry, Pointe-Calumet, Senneville, Otterburn Park, Saint-Joseph-sur-le-Lac, Pointe-des-Cascades, Oka, Carignan et Notre-Dame-de-l'île-Perrot. La température moyenne de la CMM devient alors plus élevée de 0,15°C par rapport à celle de HS N, une différence de température considérée comme négligeable.

L'élimination de certaines municipalités et l'insuffisance du nombre de stations de température de l'air représentant la CMM auraient causé une perte d'informations et ne mettraient donc pas en évidence les particularités urbaines de la CMM.

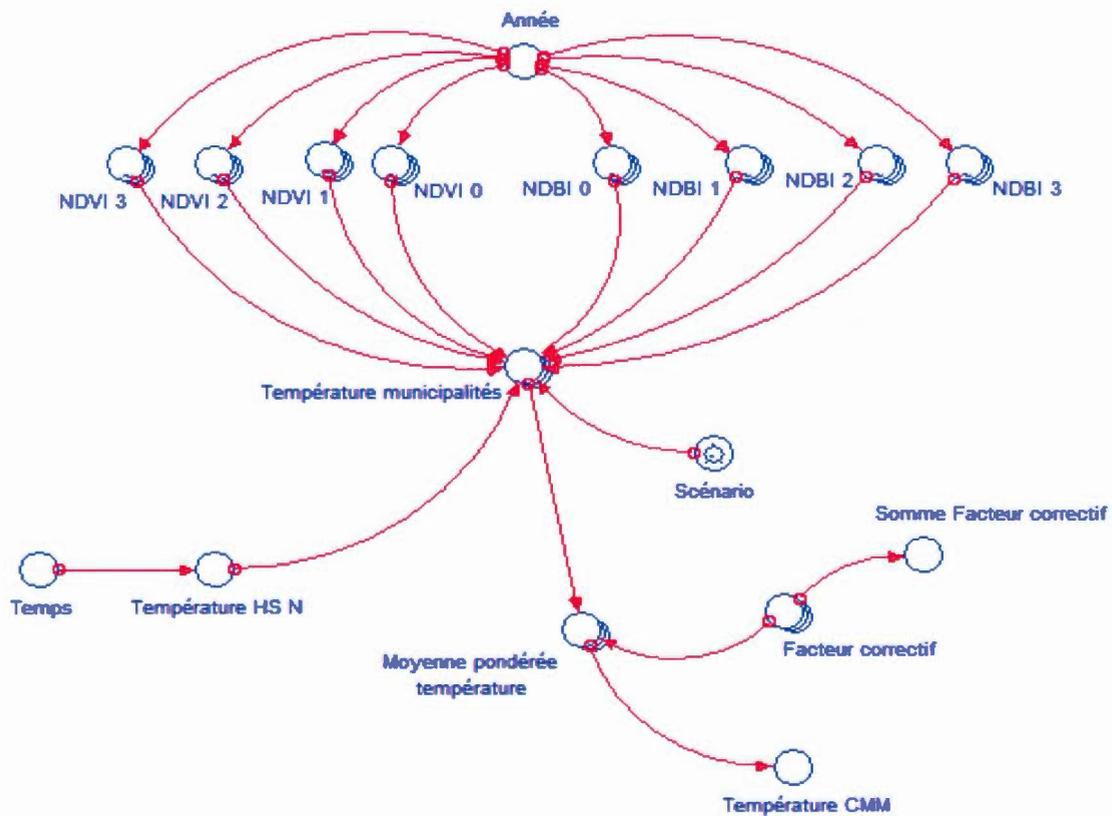


Figure 3.2 Représentation du modèle simplifié de simulation Stella

3.4 Simulation des scénarios d'aménagement à l'horizon 2050

3.4.1 Le scénario de base BAU

Le BAU correspond à l'absence de mise en œuvre de directives et de politiques concernant le NDVI et le NDBI. Ces derniers suivent la tendance actuelle de 2011 jusqu'en l'an 2050.

Bien que la température varie considérablement à chaque jour, la différence de température par rapport à HS N est de $0,15^{\circ}\text{C}$ sur la période de 3 588 jours (40 ans). En moyenne, pour cette même période, la température de la CMM est plus élevée que HS N, l'une de $19,30^{\circ}\text{C}$ et l'autre de $19,15^{\circ}\text{C}$ respectivement. Selon les analyses statistiques de calibration du modèle, il existe une différence de température d'environ 2°C entre la CMM et HS N. Pourtant, cette différence est ici bien moins importante que ce que les résultats fournissaient. D'une part, ceci serait dû à l'élimination des données de NDBI

des municipalités. D'autre part, les analyses sont réalisées par comparaison des secteurs géographiques, et non de la CMM, aux zones extérieures. De plus, ces secteurs et la CMM sont représentés par un nombre inégal de stations d'observation. Il est également probable que celles choisies ne suffisent pas pour tenir compte de l'hétérogénéité des villes à l'échelle de la CMM.

3.4.2 Le scénario 2: augmentation de 10% du NDVI

Le scénario 2 est caractérisé par l'augmentation de 10% du NDVI par municipalité en 10 ans. Ce taux a été fixé dans un contexte réaliste de contraintes budgétaires et administratives (ex. : 300 000 arbres équivalent à un budget de 300 millions de dollars), dans le cadre du projet-pilote « Plan d'action canopée 2012-2021 » de la Ville de Montréal (DGPV, 2012). Le NDBI suit la tendance actuelle, ne connaissant pas de modifications pour les années à venir.

Les résultats de la modélisation donnent un aperçu des conséquences à long terme de ce projet. Sur 10 ans, soit de 2011 à 2021, la température a diminué de 0,02°C, uniquement en augmentant de 10% le NDVI. Ensuite, elle continue de baisser en moyenne de 0,08°C sur une période de 29 ans, soit de 2021 à 2049. Ainsi, la température moyenne est passée de 19,30°C à 19,20°C en 39 ans. Bien que ces résultats paraissent peu significatifs car du même ordre de grandeur que l'erreur potentielle de mesure, ils suivent les conclusions de la littérature: la couverture végétale a un effet rafraîchissant dans une zone, baissant la température de l'air de celle-ci (Anquez et Herlem, 2011; ICIS, 2011).

La plantation d'arbres; méthode de lutte adoptée pour le projet, serait donc une bonne méthode pour diminuer la température de l'air et amoindrir le risque de formation et d'amplification des ICU (Fernandez et Deshaies, 2011; Nature Québec, 2014). Ces effets positifs s'accompagneraient d'une meilleure qualité de l'air, un espace ombré, des effets psychologiques positifs sur la population ou encore une réduction locale des émissions de GES (IAU ÎdF, 2010a; Anquez et Herlem, 2011; ICIS, 2011).

3.4.3 Le scénario 3: diminution de 5% du NDBI

Le scénario 3 correspond à la baisse de 5% du NDBI par municipalité en 10 ans avec le NDVI qui suit la tendance actuelle jusqu'en 2050. Ici aussi, cette hypothèse repose sur le projet-pilote de la Ville de Montréal (DGPV, 2012). Une diminution de la température moyenne de l'air de la CMM est observable lorsque la densité de l'environnement bâti diminue au cours du temps. Effectivement, de 2011 à 2021, la température a baissé de 0,03°C en 10 ans. Cette tendance se poursuit jusqu'en 2049, passant en moyenne de 19,27°C à 19,14°C sur 29 ans. La réduction de NDBI affecte donc la température de l'air, empêchant la formation et l'amplification des ICU.

3.4.4 Le scénario 4: hausse de 10% de NDVI et baisse de 5% de NDBI

Dans ce dernier scénario, il y a combinaison de NDVI et NDBI, équivalent de façon respectivement à une hausse de 5% et à une baisse de 10%. Les résultats montrent que la température moyenne de la CMM diminue chaque année de manière relativement « rapide ». De 2011 à 2049, la température a en moyenne diminué de 0,25°C, passant de 19,30°C à 19,05°C en 39 ans. En somme, combiner la hausse de NDVI et la baisse de NDBI favorise le rafraîchissement de la CMM au cours du temps. Comparé aux scénarios précédents, l'instauration de directives politiques d'augmentation de la couverture végétale et de diminution de la densité de l'environnement bâti est potentiellement plus efficace pour éviter au maximum la formation et l'amplification des ICU.

3.4.5 Comparaison des scénarios à HS N

En comparant le scénario BAU et la température de HS N, la température de la CMM est plus élevée que celle de HS N d'environ 0,15°C et ce, jusqu'en 2050 (40 ans). Si aucune politique et/ou plan d'action n'est mis en place et que l'état actuel de la situation se maintient, la température moyenne de la CMM restera la même jusqu'en 2050 (19,30°C), voire augmentera ou diminuera si un éventuel événement se produit. Cette étude étant à caractère prospectif, il est difficile de dire avec exactitude ce qui se produira en temps et en heure.

Lorsque les trois autres scénarios sont comparés à HS N, une baisse de température de la CMM est observable de 2011 à 2050. Pour chaque scénario d'aménagement, les résultats obtenus sont:

- scénario BAU: 19,30°C;
- scénario 2: 19,26°C;
- scénario 3: 19,23°C;
- scénario 4: 19,19°C.

Bien que l'échelle de temps soit évaluée sur une période de trois mois à chaque année, la modélisation démontre qu'il existe bel et bien une interaction entre la couverture végétale et l'environnement bâti par rapport à la température de l'air.

Par ailleurs, la température moyenne de la CMM pour les quatre scénarios est inférieure à 25,94°C. Selon l'échelle d'identification des ICU (Baudouin *et al.*, 2011), de façon générale, la CMM n'est pas une zone à ICU forts. Mais il est difficile d'affirmer ce point, car les ICU sont détectables à un niveau plus local, soit à l'échelle des municipalités ou de la ville, soit à l'échelle d'une rue (Houle, 2009). D'ailleurs, des développements futurs pourraient permettre de voir l'évolution des températures des municipalités de la CMM.

Ainsi, les mesures de lutte telles qu'accroître le nombre d'arbres en ville et/ou réduire la densité du bâti induisent une diminution de la température de l'air de manière efficace et rapide à long terme. Leur efficacité dépendent notamment du type de mesure, du temps d'avancement de sa mise en place, ainsi que des moyens et des ressources techniques, technologiques et humains.

3.4.6 Comparaison entre scénarios

Au premier abord, les températures sont similaires entre elles jusqu'en 2013. Mais des différences régulières de température sont identifiables. Elles augmentent peu à peu jusqu'en 2050 avec une accélération à partir de 2018. Par ailleurs, augmenter la couverture végétale semble avoir plus d'efficacité que réduire la densité du bâti. Cependant, à long terme, l'effet inverse se produit. La réduction de la densité du bâti est plus visible à long terme. Avoir plus d'espaces verts en ville est donc une méthode de

mesure de lutte efficace en raison de sa rapidité d'effectivité, alors que la réduction de la densité de l'environnement bâti l'est davantage à long terme.

3.4.7 Conclusion

D'une part, le travail accompli a permis de répertorier un ensemble de critères et d'indicateurs d'évaluation des impacts des ICU en termes de plans d'ACC. Malheureusement, seuls quatre indicateurs sont utilisés pour la modélisation: la température de surface (ICU) des municipalités, le NDBI, le NDVI, et la température moyenne de l'air de la zone extérieure nord. D'autre part, le traitement des données met en avant l'efficacité à long terme des mesures de lutte contre les ICU, au travers de quatre scénarios d'aménagement. L'augmentation de la couverture végétale est effective dès le court terme, tandis que la réduction de la densité de l'environnement bâti l'est sur le long terme.

En somme, les effets des plans d'action et des politiques établis se manifestent à long terme, tout en considérant qu'il faille aussi agir rapidement pour obtenir des résultats précoces. Toutefois, en supposant que l'évolution d'autres facteurs influents suit la tendance actuelle et que le projet-pilote de la Ville de Montréal (DGPV, 2012), voire d'autres projets semblables, sont mis en place, il y a lieu de se demander si le développement d'espaces verts sera suffisant. Si oui, que seraient les ajustements nécessaires à effectuer.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

4.1 Évaluation des impacts des ICU pour les plans d'ACC

À l'échelle des communautés, la mise en application de mesures d'adaptation repose sur leur planification au travers de programmes, de plans et de politiques (Greene et Robichaud, 2010; Lavaud et ARPE-Midi-Pyrénées, 2011; ADEME, 2012). À cet effet, des critères et des indicateurs d'évaluation des impacts des ICU sur le territoire de la CMM ont été définis selon quatre composantes (environnementale, économique, territoriale et sociale). Répertoriés en quatre tableaux, ils servent d'appui dans la démarche de la planification de l'ACC, plus précisément lors de l'évaluation des impacts des ICU. Ces derniers deviennent de plus en plus prépondérants dans les villes (IAU ÎdF, 2010a) et sont liés aux changements climatiques à un niveau plus local. Ceci s'explique par des modifications du microclimat urbain où l'expansion des villes induit des effets sur les populations vivant en zones urbaines (Baudouin et Cavayas, 2008; IAU ÎdF, 2010a, 2010b; Marchadier, 2013).

Selon l'ONU (2012), 70% de la population mondiale vivra dans les zones urbaines en 2050, ce qui signifie une augmentation de la densité de l'environnement bâti via la hausse des demandes d'infrastructures résidentielles et commerciales. Il faut donc faire face à une telle projection démographique. En matière d'ICU, la réalisation de plans d'ACC demande du temps, de la préparation et de l'organisation, mais aussi de déterminer les mesures d'action les plus adéquates et les plus efficaces à court et à long termes. L'une d'elle s'avère être le verdissement (Fernandez et Deshaies, 2011; Nature Québec, 2014).

D'après les résultats de cette étude, à court terme, une hausse de la densité de la couverture végétale induit de façon efficiente un rafraîchissement de l'air. Une autre serait l'installation de toits et de trottoirs froids (Baudouin et Cavayas, 2008). Les résultats, même si peu probants au regard des erreurs potentielles de mesure, indiquent que la réduction de la densité de l'environnement bâti conduit à une légère baisse de la température de l'air à long terme.

Cependant, l'identification des critères et des indicateurs d'évaluation des impacts des ICU est uniquement basée sur une analyse de la revue de la littérature. À notre connaissance, certains chercheurs ont défini plus d'une vingtaine de critères et d'indicateurs afin d'être le plus précis et le plus rigoureux possible (Greene et Robichaud, 2010; ADEME, 2012). Il est aussi tout à fait possible d'améliorer cette identification à partir des résultats d'autres études de cas. Il faut également considérer la nécessité de disposer de plus de temps, et éventuellement d'une équipe multidisciplinaire, pour évaluer l'ensemble de ces critères et de ces indicateurs.

Dans une recherche future, ce travail ouvre la voie à une approche participative d'aide multicritère à la décision, qui permettrait de considérer les préférences et les valeurs de diverses parties prenantes dans l'évaluation de la performance globale des scénarios d'adaptation aux changements climatiques des communautés urbains telles que la CMM.

4.2 Prospective pour l'ACC: résultats du modèle de simulation pour la réduction des ICU sur le territoire de la CMM

Le « Plan d'action canopée 2012-2021 » de la Ville de Montréal (DGPV, 2012) a pour objectif d'augmenter l'indice de canopée de l'île de Montréal de 20% à 25% en 10 ans, avec la participation des villes liées et des arrondissements de l'agglomération de Montréal, et d'organismes privés volontaires (DDGPV, 2012; Leduc-Frenette, 2012). Le but de ce plan d'action est de planter des arbres en différents lieux dans l'agglomération de Montréal, afin d'augmenter l'indice de canopée, mais aussi des effets positifs de la végétation envers la population, ainsi que sur les environnements naturels et bâti (Anquez et Herlem, 2011; ICIS, 2011).

D'ailleurs, une augmentation de 10% de la couverture végétale par municipalité diminuera la température de l'air à l'échelle de la CMM à long terme et par déduction, celle de l'agglomération de Montréal. Aussi, cette mesure permettra d'éviter la formation et l'amplification des ICU, voire de leur réduction. En 2011, les ICU couvraient déjà près de 15% de la superficie de l'Île-de-Montréal (Baudouin *et al.*, 2011; Lareau Carpentier, 2012).

Le modèle de simulation sous logiciel Stella a été réalisé selon quatre facteurs: la température de l'air (HS N), la température de surface (ICU) des municipalités, le NDVI et le NDBI. Ce nombre aussi faible de paramètres résulte des analyses statistiques effectuées sous logiciel JMP, qui ont conduit à l'utilisation de trois données statistiquement valides à mettre en relation avec la température de référence (température de l'air HS N). Ensuite, une équation de régression formalise la mise en relation des paramètres constituant le modèle de simulation, et explique 83% de la variance. Les 17% restants sont probablement relatifs aux autres facteurs correspondant à la représentation du processus de formation et d'amplification des ICU: les émissions de GES, la consommation énergétique, la densité de population, les espaces bleus, etc. D'autres éléments factoriels peuvent être retrouvés dans la littérature tels que le verdissement de l'environnement bâti, l'utilisation de matériaux perméables, à fort albédo et/ou clairs, etc. (CMM, 2011a; Rullier, 2012; CMM, 2013a). De plus, trois facteurs ont été exclus de l'étude: les activités économiques, les précipitations et l'agriculture.

Par ailleurs, dans ce contexte-ci, le terme *business as usual* pour le premier scénario n'est pas tout à fait approprié. Ce type de scénario représente la situation actuelle, au travers de fortes tendances, de façon précise, tenant compte d'un maximum de facteurs, selon les capacités de l'outil de modélisation et la complexité du modèle à l'étude. Pour obtenir un scénario *business as usual* typique, il aurait fallu insérer l'ensemble des facteurs évoqués précédemment, à l'aide du schéma conceptuel. La tendance de chacun aurait été considérée lors de la construction des scénarios d'aménagement.

Enfin, l'absence d'intégration de l'ensemble de ces facteurs à la modélisation, associée au manque de stations d'observation expliquent la faible différence de température moyenne entre la CMM et HS N (0,15°C). D'autres facteurs intermédiaires peuvent être considérés, notamment les diversités géographique et paysagère, les conditions de climat intra- et intersectorielles (cinq secteurs géographiques considérés), le type d'activités, auxquelles se sont engagés les secteurs géographiques, la répartition du transport et de la démographie, etc., sur le territoire de la CMM (CMM, 2011b, 2012a, 2013e, 2014b).

CONCLUSION

Le but de l'étude est de contribuer à l'élaboration d'un plan d'ACC de la CMM en illustrant une démarche potentielle de modélisation appliquée ici à la problématique des ICU. Il s'agit de proposer un outil de modélisation permettant d'évaluer les impacts des ICU au travers de scénarios d'aménagement à l'horizon 2050. Plus précisément, nous cherchons d'une part, à déterminer les critères et les indicateurs liés aux ICU et à leurs effets en étudiant le cas du territoire de la CMM et d'autre part, à illustrer l'apport de la modélisation pour réduire les effets des ICU et leurs impacts sur la santé publique lors de l'évaluation de scénarios d'aménagement à l'horizon 2050. Pour répondre au premier objectif secondaire, des critères et des indicateurs d'évaluation des impacts des ICU ont été identifiés à partir de notre revue de la littérature. Puis, la construction d'un modèle de simulation, associée à l'élaboration des scénarios d'aménagement, ont amené à leur simulation à l'horizon 2050 sous logiciel Stella.

D'un point de vue scientifique, la problématique générale de ce mémoire est divisée en deux sous-problèmes. Le premier est axé sur l'approche prospective dans le cadre de la planification stratégique de l'ACC, et le second est lié à l'approche d'aide multicritère et multi-acteurs à la décision mise en œuvre dans un contexte de planification participative et communicationnelle. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrons sur le premier sous-problème. De nature exploratoire, l'étude offre un répertoire de connaissances importantes et en fournit de nouvelles dans le cadre de la planification des villes face aux changements climatiques, en particulier en matière d'ICU. Nous cherchons à évaluer comment les villes peuvent affronter et/ou vivre avec ces changements à l'horizon 2050, considérant la croissance démographique et d'autres facteurs caractéristiques aux villes. Dans cette optique, il aurait été bon d'avoir la capacité de suggérer d'éventuelles solutions d'adaptation grâce à la projection de ces

facteurs. Par ailleurs, nous estimons que les deux objectifs secondaires de ce mémoire sont atteints. Cependant, des limites méthodologiques ont été rencontrées et des restrictions imposées lors de l'étude:

- disponibilité des données;
- exclusion de certaines variables pour réduire la complexité du problème;
- nombre restreint de variables suite aux tests statistiques établissant la validité des données pour la constitution du modèle;
- conception d'un modèle de simulation simplifié.

Les résultats de l'étude ont montré, bien qu'avec certaines réserves liées à leur signification statistique, qu'à long terme, la réduction de la densité de l'environnement bâti a plus d'impact sur la température de l'air que l'augmentation de la couverture végétale. Néanmoins, sur le court terme, c'est l'augmentation de la couverture végétale qui affecte la température de l'air. La combinaison de mesures d'actions aurait alors un effet plus important qu'une mise en œuvre séparée. Appliquer de façon simultanée des mesures de lutte pour augmenter la densité de la couverture végétale et diminuer celle de l'environnement bâti assurerait une réduction plus forte de la température de l'air. Ces mesures empêcheraient alors la formation et l'amplification des ICU, en particulier pendant l'été. Toutefois, nous ne sommes pas en mesure ni d'identifier, ni de localiser les ICU dans le cadre de ce mémoire.

De plus, les scénarios d'aménagement sont construits sur la base d'hypothèses établies à partir de la revue de la littérature. Il n'existe donc pas un seul schéma d'évolution possible de la CMM jusqu'à l'horizon 2050. La nature exploratoire de cette étude entraîne un fort degré d'incertitude quant aux événements à venir. Il faudrait donc poursuivre les travaux avec un modèle plus complet alimenté par les données appropriées. Il s'agit là d'un travail multidisciplinaire dont l'ampleur va bien au-delà des objectifs d'une maîtrise de recherche. Ce que nous avons tenté de faire est de fournir un maximum d'informations et de données existantes et nouvelles. L'analyse statistique a également restreint dans la portée de notre travail. Au lieu de vingt-deux données relatives aux indicateurs d'évaluation des impacts des ICU à intégrer à la modélisation,

nous n'en utilisons que trois (NDBI, NDVI, température de surface), mis en relation avec la température de l'air HS N (température de référence). Par ailleurs, il est possible d'améliorer les tableaux d'évaluation des impacts des ICU, ainsi que la collecte de données.

Pour plusieurs raisons, nous avons restreint la portée de ce mémoire en excluant certains facteurs: les activités économiques, les précipitations et l'agriculture. En premier lieu, les activités économiques considèrent une trop grande quantité de paramètres pour qu'ils puissent tous être intégrés au modèle de simulation Stella. En deuxième lieu, si la prise ne compte des précipitations dans la modélisation des ICU est discutée dans la littérature, il est bien établi que lorsqu'il s'agit d'ICU, c'est la température qui devient le principal facteur à prendre en considération. En dernier lieu, nous avons exclu l'agriculture, à l'instar de l'étude de Baudouin *et al.* (2011) sur l'identification et la localisation des ICU.

De surcroît, à notre connaissance, le logiciel Stella est utilisé pour la première fois dans le cadre de la modélisation des ICU. Pratique et facile à manipuler, son fonctionnement a été simple à comprendre, en particulier au stade de la lecture et de l'interprétation des résultats.

Dans une recherche future, il serait souhaitable d'incorporer d'autres critères d'évaluation des impacts des ICU ou d'améliorer ceux proposés dans ce mémoire. De cette façon, les bases de données en matière d'adaptation et de planification stratégique seraient mises à jour, en plus de celles concernant la CMM. Cette nouvelle étude pourrait aussi ouvrir la voie à une réflexion sur les façons de mettre en œuvre une planification participative et communicationnelle, soit le second sous-problème de notre problématique générale. Elle engagerait et préparerait à la discussion entre les parties prenantes, dans le cadre de la mise en place de politiques et/ou de plans d'action de lutte aux ICU dans les zones urbaines.

ANNEXE A

LA BASE DE DONNÉES

Tableau A.1 Extrait de la table de données des températures moyennes par secteur
(Source: Environnement Canada, <http://climat.meteo.gc.ca/>)

| Date | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | HS N | HS S |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 01/06/2011 | 24,03 | 22,80 | 23,07 | 20,87 | 24,23 | 21,71 | 24,90 |
| 02/06/2011 | 13,50 | 14,10 | 13,27 | 15,73 | 13,30 | 11,27 | 13,43 |
| 03/06/2011 | 15,30 | 15,50 | 15,10 | 14,47 | 14,97 | 14,01 | 14,44 |
| 04/06/2011 | 14,80 | 13,90 | 15,13 | 15,17 | 14,29 | 13,50 | 14,35 |
| 05/06/2011 | 18,50 | 16,20 | 18,47 | 17,80 | 17,28 | 15,46 | 17,18 |
| 06/06/2011 | 20,50 | 18,80 | 20,13 | 20,07 | 19,60 | 19,45 | 19,75 |
| 07/06/2011 | 23,00 | 21,80 | 22,40 | 20,37 | 22,08 | 21,45 | 22,24 |
| 08/06/2011 | 26,50 | 25,40 | 25,67 | 18,27 | 25,38 | 24,35 | 26,04 |
| 01/07/2011 | 20,80 | 21,00 | 21,27 | 19,95 | 20,25 | 18,68 | 20,89 |
| 02/07/2011 | 23,50 | 22,70 | 23,43 | 22,21 | 22,74 | 20,54 | 23,25 |
| 03/07/2011 | 26,00 | 25,30 | 25,13 | 25,15 | 24,95 | 22,73 | 24,73 |
| 04/07/2011 | 24,50 | 23,90 | 24,63 | 23,85 | 24,40 | 22,03 | 24,53 |
| 05/07/2011 | 24,00 | 23,90 | 24,03 | 22,80 | 23,49 | 21,04 | 23,73 |
| 06/07/2011 | 22,44 | 22,00 | 21,97 | 21,00 | 21,44 | 20,20 | 21,98 |
| 07/07/2011 | 20,00 | 18,40 | 19,73 | 19,45 | 19,83 | 18,00 | 19,73 |
| 08/07/2011 | 20,30 | 19,60 | 20,57 | 19,55 | 19,97 | 18,65 | 20,03 |

| | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 01/08/2011 | 24,48 | 23,40 | 24,10 | 24,15 | 24,50 | 23,82 | 24,80 |
| 02/08/2011 | 20,80 | 20,20 | 20,47 | 20,65 | 20,53 | 18,23 | 20,65 |
| 03/08/2011 | 19,80 | 18,90 | 20,03 | 19,05 | 19,28 | 17,48 | 19,15 |
| 04/08/2011 | 21,80 | 21,50 | 21,37 | 21,10 | 21,34 | 19,80 | 21,25 |
| 05/08/2011 | 23,30 | 22,00 | 22,90 | 22,70 | 22,80 | 20,70 | 21,75 |
| 06/08/2011 | 24,80 | 23,20 | 24,67 | 23,80 | 23,44 | 21,56 | 23,35 |
| 07/08/2011 | 25,20 | 25,20 | 24,87 | 24,45 | 25,10 | 22,79 | 24,63 |
| 08/08/2011 | 23,64 | 21,30 | 22,73 | 22,05 | 22,88 | 20,99 | 22,58 |

Légende

HS N: température moyenne de la zone extérieure nord de la CMM (hors-secteur nord)

HS S: température moyenne de la zone extérieure sud de la CMM (hors-secteur sud)

S1: température de l'air de Laval

S2: température moyenne de l'agglomération de Longueuil

S3: température moyenne de l'agglomération de Montréal

S4: température moyenne de la Couronne Nord

S5: température moyenne de la Couronne Sud

Tableau A.2 Extrait de la table de données des municipalités (Source: Baudouin *et al.*, 2011).

| Municipalités | Temp | NDVI | NDBI | Dpop | GES | NRJ |
|--|-------|------|-------|----------|---------|-------|
| Ahuntsic/Cartierville | 28,51 | 0,28 | 0,04 | 5252,10 | 765,86 | 0,089 |
| Anjou | 30,12 | 0,21 | 0,10 | 3064,90 | 433,56 | 0,050 |
| Côte-des-neiges/Notre-Dame-de-Grâce | 27,28 | 0,31 | 0,03 | 7697,30 | 677,24 | 0,079 |
| L'île-Bizard/Sainte-Geneviève | 24,38 | 0,47 | -0,08 | 766,80 | 746,87 | 0,087 |
| Lachine | 27,42 | 0,21 | 0,08 | 2348,50 | 560,15 | 0,060 |
| LaSalle | 28,34 | 0,21 | 0,07 | 4565,20 | 515,84 | 0,060 |
| Mercier/Hochelaga-Maisonneuve | 29,33 | 0,20 | 0,08 | 5174,50 | 803,83 | 0,093 |
| Montréal Nord | 30,74 | 0,20 | 0,10 | 7589,90 | 351,28 | 0,041 |
| Outremont | 26,51 | 0,36 | 0,00 | 6121,00 | 123,42 | 0,014 |
| Pierrefonds/Roxboro | 26,40 | 0,43 | -0,04 | 2528,10 | 857,63 | 0,100 |
| Plateau Mont-Royal | 30,65 | 0,17 | 0,09 | 12348,10 | 256,34 | 0,030 |
| Rivière-des-Prairies/Pointe-aux-Trembles | 27,65 | 0,31 | 0,02 | 2517,40 | 1338,67 | 0,031 |
| Rosemont/La Petite Patrie | 29,21 | 0,25 | 0,06 | 8456,70 | 503,19 | 0,058 |
| Saint-Laurent | 28,70 | 0,21 | 0,09 | 2194,10 | 1354,49 | 0,158 |
| Saint-Léonard | 31,09 | 0,17 | 0,11 | 5612,10 | 427,23 | 0,050 |
| Sud-Ouest | 28,02 | 0,21 | 0,07 | 4562,90 | 496,86 | 0,058 |
| Verdun | 26,84 | 0,27 | 0,02 | 6809,90 | 306,97 | 0,036 |
| Ville-Marie | 27,79 | 0,17 | 0,06 | 5085,50 | 522,17 | 0,061 |
| Villeray/Saint-Michel/Parc-Extension | 30,50 | 0,19 | 0,10 | 8624,70 | 522,17 | 0,061 |

Légende

Temp: température de surface des municipalités (°C)

NDVI: indice de végétation par différence normalisée

NDBI: indice de bâti par différence normalisée

ANNEXE B

LA PLANIFICATION: DÉFINITIONS ET CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

B.1 Les définitions et les caractéristiques de la planification

Risse (2004) situe la planification comme une fonction qui interagit avec trois autres dans le processus de gestion tel que défini par Lang et Armour en 1980 (Figure B.1). L'ensemble assure l'encadrement de la mise en œuvre d'un objet. En nous référant à la figure B.1, les fonctions associées à la gestion sont:

- la planification qui détermine des objectifs précis et propose des directives et des actions afin d'atteindre ces objectifs;
- l'organisation qui sert à rassembler et coordonner les activités. Elle cherche à définir et à hiérarchiser les relations entre les responsables de la gestion;
- le contrôle afin d'évaluer les réalisations faites par rapport à celles envisagées dans la planification et rectifie le rendement, ainsi que les documents de planification s'il y a lieu;
- la direction qui informe et rend des comptes aux personnes concernées par le processus de gestion.

Ainsi, la planification est une démarche axée sur des objectifs à atteindre en fonction d'un plan bien défini (Gauthier, Simard et Waaub, 2011; Samoura, 2011). Selon Peaucelle (2011), le plan représente un ensemble de directives et de propositions d'actions qui servent d'appui pour atteindre des objectifs définis, accompagnées de l'évaluation ou le suivi de ces directives.

Suite à une analyse de la littérature, Risse (2004) a regroupé cinq définitions caractéristiques de la planification, qui renvoient à:

- la vision de l'avenir et à la réflexion qui supporte cette vision;
- les actions et leur description en lien avec cette vision et en vue d'orienter l'avenir;
- un processus capable de prévoir et donc, déterminer préalablement les actions et les ressources nécessaires pour atteindre les objectifs fixés selon un horizon temporel;
- la mise en place d'une procédure décisionnelle formalisée visant à définir des moyens répondant aux objectifs selon une démarche structurée;
- l'implication de différents acteurs représentant des intérêts variés sur les plans social et politique.

La planification se définirait donc comme un processus fondé sur une vision, et marqué par des choix et des prises de décisions impliquant divers acteurs, afin de répondre à des objectifs prédéfinis pour un horizon temporel donné.

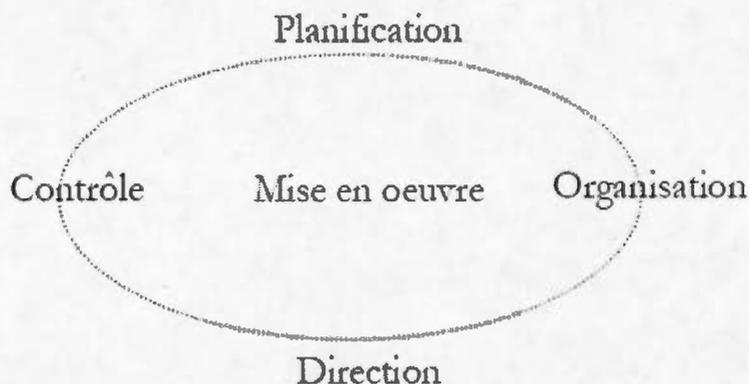


Figure B.1 Schéma représentant le processus de gestion (Tiré de Lang et Armour, 1980, p. 255 cité dans Risse, 2004)

B.2 Le rôle de l'évaluation dans la planification

Les plans d'adaptation aux changements climatiques font partie intégrante des démarches de planification du territoire. Ceux-ci devraient alors faire l'objet des procédures d'évaluation environnementale stratégique (ÉES) (Risse, 2004; Gauthier, Simard et Waaub, 2011; Waaub, 2012, 2013). Utilisée en amont des projets, l'ÉES est un outil d'évaluation des impacts, négatifs et/ou positifs, sur l'environnement et, sert d'appui dans la recommandation d'actions concrètes au cours de discussions impliquant différents

acteurs (Risse, 2004; Gauthier, Simard et Waaub, 2011; Samoura, 2011; Waaub, 2012). Elle s'imbrique aussi dans le système d'aide à la décision, nécessaire lors des prises de décisions (Risse, 2004; Waaub, 2012).

L'ÉES est notamment associée aux documents de planification, comme par exemple les Politiques, Plans, Programmes (PPP), qui sont définis comme suit (Waaub, 2012; Côté, Waaub et Mareschal, 2015):

- politiques: règles déontologiques générales ou propositions d'orientation guidant les prises de décisions (livres blancs, stratégies, règlements, etc.)
- plans: propositions stratégiques élaborées selon un horizon temporel, appuyées de priorités, d'options et de mesures, afin de consolider la politique et la mettre en application (plan de développement, d'urbanisme, etc.);
- programmes: calendrier très organisé portant sur les engagements, les instruments proposés et les activités. Il a la même fonction que les plans (mesures d'assistance financière au développement, etc.).

De plus, la relation entre la planification et l'ÉES s'inscrit dans le cadre prospectif, référant à l'exploration des futurs possibles d'un enjeu, d'un objet ou d'une action (Massiah et Tribillon, 1985; Gallez et Maksim, 2007; Gauthier, Simard et Waaub, 2011; Waaub, 2012). Ceci implique alors l'élaboration d'actions stratégiques, ainsi que l'établissement et/ou la révision des stratégies et des plans d'action (Mermet, 2004; Destatte, 2011; Alcaras et Lacroux, 2013). Le but est de mettre en évidence les transformations et les changements moteurs des secteurs d'un territoire, afin de visualiser leurs dynamiques futures (CGP, 2004; Loinger et Spohr, 2004; de Jovenel, 2009; ICRA, 2013).

En termes de prospective et de ville, avoir une vision sur le long terme permet aux villes d'anticiper les effets des changements climatiques et d'agir avant même qu'un événement climatique ne soit observé (Gallez et Maksim, 2007). Effectivement, « [...] les municipalités sont stratégiquement bien placées pour adopter des mesures d'adaptation et mettre en œuvre des pratiques écologiquement viables » (ICURR, 2008, p. 21).

Cependant, il est difficile d'appréhender la réalité d'événements incertains avec nos capacités limitées. Le monde d'aujourd'hui est en constante évolution et de nombreuses variables sont à considérer lorsqu'il s'agit d'explorer le futur, sachant qu'il existe un grand éventail de futurs possibles (de Jouvenel, 2002; Destatte, 2011). Les plans d'ACC sont des propositions stratégiques. Ils devraient ainsi faire l'objet d'une évaluation environnementale stratégique.

B.3 Les théories de la planification

L'ÉES est influencée par cinq courants théoriques liés à la planification (Waaub, 2012). Chaque courant implique des façons de faire, la mobilisation d'outils, une conception des acteurs sociaux concernés et la façon dont ils interagissent ainsi que par les plans d'ACC des communautés urbaines d'après les propos de Simonet (2011).

B.3.1 La planification rationnelle globale (*comprehensive planning*)

Elle se définit comme une démarche, un ensemble de processus suivant la logique et le bon sens (raison et cohérence), ainsi que systématique. Axée sur une vision d'ensemble d'une situation, elle repose sur un processus décisionnel itératif, avec l'appui des outils afin d'atteindre les objectifs fixés. Cette approche s'appuie sur une conception selon laquelle l'octroi public qui vise à résoudre les problèmes de planification doit être guidé par la science. Les informations et les arguments scientifiques visent à résoudre les problèmes ou du moins, à déterminer les mesures, les actions ou les alternatives à mettre en œuvre en ce sens. La planification rationnelle prend notamment forme dans les transformations structurelles et les choix collectifs. La communication ne s'opère qu'entre l'expert et le décideur. Aucune autre communication n'est ici jugée nécessaire (Côté *et al.*, 2001; Risse, 2004; Waaub, 2012). Malheureusement, « La participation des publics n'intervient donc qu'aux dernières étapes du processus de planification et occupe essentiellement une fonction de validation » (Waaub, 2012, p. 10). La planification rationnelle globale a notamment été critiquée pour son insuffisance d'apports des connaissances. Il en ressort des écarts significatifs entre les intentions initiales et la pratique, et elle est difficilement applicable dans les situations de conflits d'intérêts (Risse, 2004; Waaub, 2012).

B.3.2 La planification stratégique

La planification stratégique s'appuie sur la connaissance des experts et la consultation du public (ressources internes et externes) selon des mécanismes de coopération dans les prises de décisions ou les débats (Risse, 2004; Waaub, 2012). Elle met en évidence les forces et les faiblesses des enjeux identifiés afin d'extraire les données pertinentes au modèle des experts (Zagamé, 1993; Risse, 2004; Waaub, 2012). Bien qu'elle soit considérée comme une évolution théorique en réaction à la planification rationnelle globale, elle connaît certaines limites dont l'implication des experts qui reste considérable, contrairement à celle du public qui demeure faible (Risse, 2004; Waaub, 2012).

B.3.3 La planification incrémentielle (par petits pas)

D'après Risse (2004, p. 38), la planification incrémentielle est un « processus décisionnel décentralisé, ralliant plusieurs acteurs détenant des intérêts divergents ». Ici, autant les acteurs des secteurs privé et public (experts, acteurs politiques, organisations, etc.) ont une part importante, la planification s'imbriquant alors dans une série de consultations et de débats lors des prises de décisions. Les enjeux et les alternatives associées sont considérés de manière restreinte via des études d'analyses et d'évaluation (pratique et expérience) (Risse, 2004). « L'État (décideur) sert en ce sens de médiateur indépendant, et cherche à obtenir des compromis entre les acteurs concernés » (Risse, 2004, p. 39).

Ce type de planification est fondée sur la prise de décisions de type opérationnel, qui aboutit à des actions. Celles-ci peuvent amener à d'autres actions selon le résultat qu'elles offrent, suite à leur mise en application (Côté *et al.*, 2001). D'ailleurs, « elle vise à gérer la réalité de façon fonctionnelle en insistant sur les moyens d'allocation satisfaisante des ressources disponibles » (Côté *et al.*, 2001, p. 254).

Elle a, pendant longtemps, été critiquée en raison de sa vulnérabilité aux jeux de pouvoirs s'exerçant sur le terrain, de la vision à court terme qu'elle offre et de l'absence de la prise en compte des innovations. D'une part, plusieurs types d'acteurs participent aux prises de décisions, mais les intérêts des acteurs ayant plus de pouvoir sont davantage pris en

considération (Risse, 2004). D'autre part, la planification incrémentielle met l'accent sur le court terme, reposant sur des changements de faible importance qui ne permettent pas les innovations (Risse, 2004).

B.3.4 La planification justificative (*advocacy planning*)

La planification justificative est une démarche qui intègre différents acteurs, de types privé et public, et aussi la prise en compte de leurs valeurs individuelles (experts, citoyens, politiciens, etc.) (Risse, 2004). L'ensemble des intérêts de chaque acteur alimente les prises de décisions, au travers de nombreux débats, notamment externes. Chaque acteur (groupe ou individu; citoyen, politicien ou expert) a le droit de faire part de son opinion et de ses valeurs, ainsi que d'être tenu informé des raisons justifiant la planification (Côté *et al.*, 2001; Risse, 2004).

Bien que la participation du public représente un poids plus important, il est parfois difficile de trouver un consensus ou un compromis lors des prises de décisions (Risse, 2004; Waaub, 2012). Chaque groupe d'acteurs ou d'individus cherche à assouvir ses intérêts, ce qui reflète une dissonance entre les objectifs à atteindre et les mesures à mettre en application telles qu'énoncées dans les plans d'action. Un autre inconvénient en ressort : les aspects physiques du territoire et de son fonctionnement sont plus ou moins « délaissés » (Risse, 2004). Enfin, il ressort que l'expression des intérêts de chacun ne conduit pas nécessairement à la prise en compte des valeurs de l'ensemble de la société.

B.3.5 La planification concertée (ou communicationnelle)

Aussi dite interactive, ce type de planification peut s'avérer complémentaire à la planification stratégique, en mettant l'accent sur la concertation et la communication des acteurs et/ou des groupes d'acteurs. En plus des arguments scientifiques et des intérêts des acteurs, cette planification prend en compte les connaissances externes à l'étude, plus particulièrement celles provenant des acteurs locaux (Côté *et al.*, 2001; Waaub, 2012). Elle s'inscrit dans la logique de la pensée socioconstructiviste et cherche à consolider connaissances et actions, mettant l'emphase sur les choix collectifs et les enjeux énoncés par chaque acteur participant au dialogue (Côté *et al.*, 2001; Risse, 2004; Waaub, 2012).

Sa mise en œuvre est caractérisée par l'argumentation, le dialogue ou encore la négociation entre les différents acteurs, jusqu'à ce qu'ils trouvent un terrain d'entente, soit un consensus (Waub, 2012).

Pourtant, la planification concertée se heurte à des difficultés supplémentaires ou son utilisation n'est pas très appropriée dans certaines circonstances, en particulier lors d'enjeux très complexes. Des choix décisifs à long terme voire à grande portée spatiale, ou lorsque chacun des acteurs prend une position fondamentalement différente sont également à faire (Risse, 2004).

ANNEXE C

L'ANALYSE STATISTIQUE PRÉLIMINAIRE

En amont de la modélisation, des tests statistiques ont été effectués afin d'une part, de valider les données recueillies et d'autre part, de calibrer le modèle de simulation Stella. Les tests de validations des données ne sont pas présentés ici. Ils ont démontré que les données ne correspondaient pas à une distribution normale et ne pouvaient donc pas être utilisées dans le modèle de simulation. Elles ne correspondaient pas non plus aux conditions d'application d'une ACP visant à établir les variables significatives à prendre en compte dans le modèle de simulation.

Les tests de calibration du modèle ont tout d'abord pour but de déterminer une température de référence, nécessaire à la construction du modèle de simulation et à l'élaboration des scénarios d'aménagement. Ces tests statistiques consistent à comparer les secteurs géographiques dans et hors du territoire de la CMM sur une période de trois mois (juin, juillet, août) en 2011.

Rappelons que le territoire de la CMM est subdivisée en cinq secteurs géographiques: les agglomérations de Montréal, de Longueuil et de Laval, et les Couronnes Nord et Sud. Sa zone extérieure l'est en deux secteurs: le hors-secteur nord (HS N) pour la zone nord et le hors-secteur sud (HS S) pour la zone sud.

C.1 Profil général des secteurs

De manière générale, les températures moyennes de la CMM et de sa zone extérieure évoluent de façon semblable (Figure C.1). Néanmoins, des variations de température sont

détectables entre HS N et les autres secteurs, ainsi qu'entre la CMM et HS S. La zone extérieure nord connaît des températures plus basses entre 2 à 4°C, alors que celle au sud des températures plus élevées de 1 à 3°C.

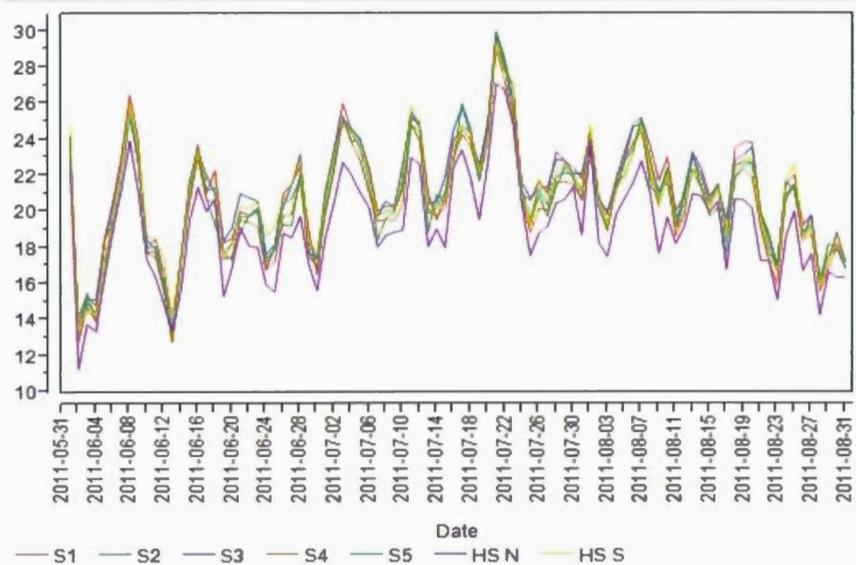


Figure C.1 Évolution de la température moyenne quotidienne de la CMM et de sa zone extérieure (°C) durant les mois de juin à août 2011 – Plateforme Stella

Suite à un test de corrélation, il a été observé que la température moyenne quotidienne entre les sept secteurs est majoritairement similaire: si la température dans un secteur augmente, alors il y a une forte probabilité que la température des autres secteurs suive cette tendance. Cependant, dans un même secteur, les températures moyennes quotidiennes varient de quelques degrés selon leur localisation géographique et leur taux d'humidité. Par exemple, le vendredi 20 juin 2014 à 13h05, l'agglomération de Montréal connaît une température de 20°C à Montréal-Nord (38% d'humidité), de 19°C à Montréal-Est (40% d'humidité) et 18°C à Montréal-Ouest (40% d'humidité). Un autre exemple avec la Couronne Nord, le 28 juillet 2014 à 9h45: la température à Saint-Sulpice est de 17°C (80% d'humidité), à Blainville de 18°C (77% d'humidité) et à l'Île-Cadieux de 19°C (70% d'humidité) (40% d'humidité) (Météomédia, 2014; Paquet, 2014).

C.2 Comparaison des températures moyennes de la CMM et des zones extérieures

Dans cette section, la température moyenne de la CMM est comparée en premier lieu, à HS N et en deuxième lieu, à HS S. Les comparaisons sont effectuées en deux étapes, suivant un protocole expérimental statistique (Paquet, 2014):

- l'analyse de corrélation: elle détermine le niveau d'interaction entre deux variables qui mesurent des individus d'une même population;
- l'analyse de covariance: elle permet d'éliminer les variables intermédiaires qui ont peu d'effet sur la variable dépendante.

À l'échelle de la CMM, la température moyenne de la CMM et celle des zones extérieures connaissent une forte corrélation, soit avec HS S une valeur de 0,971 et avec HS N de 0,960. Sans tenir compte des effets locaux potentiels, il est probable que la proximité de la zone extérieure et la variation de température des cinq secteurs pour une courte période (juin, juillet, août 2011) ont une influence sur ces résultats. En effet, bien que les températures des secteurs soient liées, il existe des différences entre les secteurs et dans un même secteur.

Ensuite, l'analyse de covariance est réalisée. En premier lieu, les cinq secteurs et la zone extérieure nord ont le même profil de température, variant de 12 et 13,5°C à 27,5 et 29°C. Si la température moyenne d'un secteur augmente, alors celle des autres secteurs augmente. De plus, selon le test des pentes de la droite de régression réalisé, il n'existe pas de différence significative entre les pentes de chaque droite des secteurs par rapport à HS N ($F=9,199$); elles sont similaires. Cependant, cette différence est présente au niveau des ordonnées des ces droites par rapport à HS N ($F<0,001$), révélée par le test des ordonnées. Puis, un test t de Student de la moyenne des moindres carrés a montré que la relation de température moyenne entre Laval et l'agglomération de Montréal est très forte, et que l'agglomération de Longueuil a un comportement variant entre celui de Couronne Nord et Couronne Sud, tous deux étant complètement différents. Finalement, la différence de température moyenne entre la CMM (Temp moy) et HS N est mathématiquement déterminée via un test de régression simple ($y_i = b_0 + b_1x$ selon Brocard, 2004, p. 2). Il fournit l'équation mathématique suivante:

$$\begin{aligned}\text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= 1,2757503 + 1,0204708 * \text{HS N} \\ \text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= 1,27 + 1,02 * \text{HS N}\end{aligned}$$

À partir du graphique, la droite de régression, appelée D_1 , ne passe pas par l'origine (0) en son ordonnée. Effectivement, D_1 a pour ordonnée 1,27 qui a été déterminée par calcul à l'aide de l'équation de régression:

$$\text{Équation 1: Si HS N} = 0, \text{ alors Temp moy } (^{\circ}\text{C}) = 1,27 + 1,02 * 0 = 1,27$$

Pour qu'un point (x; y) appartienne à D_1 , soit le couple (HS N, Temp moy), alors il faut qu'il réponde à l'équation 1: le couple (0; 1,27) appartient à D_1 . Ce résultat correspond à la valeur de l'ordonnée ($y = \text{Temp moy} = 1,27$) quand le point en abscisse est égal à 0 ($x = \text{HS N} = 0$). À l'aide de l'équation de régression, nous avons également déterminé la différence de température entre la CMM et HS N, appliquant la formule suivante:

$$\begin{aligned}\text{D'où Temp moy} &= 1,02 * \text{HS N} \\ \text{Si HS N} = 30^{\circ}\text{C}, \text{ alors la température moyenne de la CMM est:} \\ \text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= 1,02 * \text{HS N} + 1,27 = 1,02 * 30 + 1,27 = 31,87\end{aligned}$$

Ici, le test a démontré que la différence de température est caractérisée par la pente ($b_1 = 1,02$) avec une ordonnée à l'origine égale à 1,27. D'où, plus la température augmente et plus la différence de température entre la CMM et HS N augmente d'environ 2°C . Par exemple, si la température de HS N est de 30°C , alors celle de la CMM est approximativement de $31,87^{\circ}\text{C}$ (32°C). Par ailleurs, en supposant que la zone extérieure est sans ICU, ces derniers seraient concentrés dans la CMM en raison des centres urbains et des activités anthropiques (Baudouin *et al.*, 2011; Perspective Grand Montréal, 2011). Si la température moyenne de la CMM est de 32°C , alors selon l'échelle d'identification des ICU (Baudouin *et al.*, 2011), la CMM est une zone à moyen ICU ($[31,94; 32,94[$). Au-delà de $32,94^{\circ}\text{C}$, les îlots de chaleur urbain sont considérés comme forts.

En deuxième lieu, les comportements de la température moyenne de chaque secteur géographique de la CMM et de HS S sont similaires. Ils sont marqués par l'absence de différence significative entre les pentes des droites ($F = 0,8897$) selon le test de pentes des

droites de régression. Ainsi, l'augmentation de température d'un secteur est suivie de celle des autres. Par contre, cette différence existe entre les ordonnées de ces droites ($F < 0,0001$), excepté celles de Laval et de l'agglomération de Montréal. Puis, un test t de Student de la moyenne des moindres carrés montre que les températures moyennes de Laval et l'agglomération de Montréal sont similaires. Celles des trois autres secteurs diffèrent entre elles ainsi que pour Laval et l'agglomération de Montréal. Enfin, par un test de régression, la comparaison des températures moyennes de la CMM et de HS S est mise en évidence mathématiquement par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}\text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= 0,1109293 + 0,9888786 * \text{HS S} \\ \text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= 0,111 + 0,989 * \text{HS S}\end{aligned}$$

L'ordonnée de la droite de régression est alors déterminée par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}\text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= 0,111 + 0,989 * \text{HS S} \\ \text{Équation 2: Si HS S} &= 0, \text{ alors Temp moy } (^{\circ}\text{C}) = 0,111 + 0,989 * 0 = 0,111\end{aligned}$$

Pour que le couple (HS S; Temp moy) appartienne à D_2 , il faut qu'il réponde à l'équation 2: le couple (0; 0,111) appartient à D_2 . D'où la différence de température entre la CMM et HS S est: $\text{Temp moy} = - 0,989 * \text{HS S}$, car la pente b_1 est inférieure à 1. Or, nous cherchons à ce que la pente tende le plus possible vers 1, selon la loi normale centrée réduite. Nous obtenons:

$$\begin{aligned}\text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= - 0,989 * \text{HS S} + 0,111 = - (1-0,989) * \text{HS S} + 0,111 \\ \text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= - 0,011 * \text{HS S} + 0,111 \\ \text{Si HS S} &= 30^{\circ}\text{C}, \text{ alors la température moyenne de la CMM est:} \\ \text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= - 0,011 * \text{HS S} + 0,11 + \text{HS S} \\ \text{Temp moy } (^{\circ}\text{C}) &= - 0,011 * 30 + 0,11 + 30 = 29,78\end{aligned}$$

Si HS N est de 30°C , celle de la CMM est approximativement la même, soit $29,78^{\circ}\text{C}$ (30°C). De plus, d'après l'échelle d'identification des ICU (Baudouin *et al.*, 2011), les zones ayant des températures supérieures à $30,94^{\circ}\text{C}$ correspondent à des zones à îlots de chaleur (faibles, moyens, forts). Ainsi, lorsqu'une température de plus de 31°C est

enregistrée dans la zone extérieure sud, il est possible que l'un des facteurs influents soit les ICU, associés ou non à d'autres facteurs.

C.3 Comparaison des zones extérieures de la CMM

Par un test des grandeurs appariées, la comparaison entre HS S et HS N se caractérise par une différence des moyennes de 1,79, associée à une marge d'erreur de 5% (HS S=20,94°C et HS N=19,15°C). Il s'agit d'une faible différence d'environ 1 à 2°C pour une forte corrélation entre ces deux zones (0,9660), alors qu'il était attendu une différence de température plus élevée (2 à 4°C).

C.4 Conclusion

L'ensemble des analyses statistiques a démontré que la zone extérieure nord a une température moyenne de 2°C inférieure à celle de la CMM. Alors que, celle de la zone extérieure sud est similaire à la température moyenne de la CMM et ce, en raison des conditions météorologiques et de l'organisation des territoires. La température moyenne de la zone extérieure nord servira donc de température de référence lors de la modélisation. En effet, celle-ci correspondra à la température moyenne de l'air de la zone avoisinante de la CMM. Il est ainsi possible d'évaluer les ICU par rapport aux autres facteurs d'influence.

Toutefois, cette analyse statistique connaît quelques lacunes. Il est probable que les résultats obtenus soient sujets à des biais de représentation et d'artéfacts liés aux données recueillies pour la calibration du modèle. En effet, d'une part, les différences de température moyenne d'une station météorologique à l'autre au sein de la CMM et celles l'entourant peuvent en partie s'expliquer par les effets locaux ici ni mesurés et ni quantifiés. D'autre part, puisque la démarche de récolte des données de température nous est inconnue, il n'est pas possible d'en établir les limites méthodologiques (Environnement Canada, <http://climat.meteo.gc.ca/>).

BIBLIOGRAPHIE

- AECOM Tecsalt Inc. (2012). *Impact du Plan métropolitain d'aménagement et de développement sur le Portrait des émissions de gaz à effet de serre sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal* (Rapport 0522104). p. 1-18. Récupéré le 20 août 2013 de http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/pmad2012/documentation/20120131_PMad_rapportGES.pdf.
- Agence métropolitaine de transport (AMT), Société de transport de Montréal (STM), Réseau de transport de Longueuil (RTL), Société de transport de Laval (STL), Association québécoise du transport intermunicipal et municipal (AQTIM), ministère des Transports du Québec (MTQ) et ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT). (2008). *Enquête Origine-Destination 2008 – La mobilité des personnes dans la région de Montréal*. Québec : Secrétariat aux enquêtes Origine-Destination métropolitaines, 208 p.
- Ahmed Mahmoud, A. H. et El-Sayed, M. A. (2011). Development of sustainable urban green areas in Egyptian new cities: the case of El-Sadat City. *Landscape and Urban Planning*, 101(2): 157-159.
- Allaire, M. (2013, septembre). *La mise en œuvre de la Trame verte et bleue : Du fleuve aux Montérégiennes*. Communication présentée au Forum Trame verte et bleue, Communauté métropolitaine de Montréal, 14 p.
- Anquez, P. et Herlem, A. (2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions*. Montréal: Chaire de responsabilité sociale et de développement durable ESG-UQÀM, 19 p.
- Apparicio, P., Séguin, A.-M. et Leloup, X. (2007). *Analyse de la répartition spatiale de l'offre et de la demande de logements sociaux et abordables sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal*. Institut national de la recherche scientifique Urbanisation, Culture et Société, Communauté métropolitaine de Montréal, p. 1-25.

- Aubé, M., Drolet, C., Matte, A., Sottile, M.-F., Équipe Sciences du climat, Gervais, D., Barr, C.-A., Desmarais, L., Douville, C. et Dupont, S. (2011). *Changements climatiques: Vulnérabilité et adaptation des immeubles*. Corporation d'hébergement du Québec, 105 p.
- Auger, N., Kuehen, R., Goneau, M. et Daniel, M. (2011). Preterm birth during an extreme weather event in Québec, Canada: a natural experiment. *Maternal and Child Health Journal*, 15(7): 1088-1096.
- Bailly, A. S. (1974). Modèles de planification urbaine et régionale. *Espace géographique*, 3(2):157.
- Baudouin, Y. et Cavayas, F. (2008). *Étude des biotopes urbains et périurbains de la CMM – Volets 1 et 2 : Évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (1984-2005)*. Québec: Conseil Régional de l'Environnement Laval, 120 p.
- Baudouin, Y., Lefebvre, S., Baillargeon, T., Hoerth, C., Lareau, F., Mathieu, R. et Tremblay, M. (2011). *Guide d'aménagement associé aux mesures de mitigation des îlots de chaleur en milieu urbain (Rapport synthèse) – Guide to planning mitigation with heat islands in urban areas (Summary report)* (6585-B208). Montréal: SCHL, 31 p.
- Baynham, M. (2011). *Are we planning effectively for climate change? An evaluation of official community plans in British Columbia*. Thèse de doctorat, Colombie Britannique, Université de Colombie Britannique, p. 1-37, 47.
- Bélanger, D., Gosselin, P., Valois, P., Abdous, B. et Bizier-Blanchette, D. (2007). *Changements climatiques au Québec méridional: perceptions de la population générale et suggestions d'adaptations futures*. Institut national de la santé publique du Québec (INSPQ), no 618, 295 p.
- Bierbaum, R., Smith, J. B., Lee, A., Blair, M., Carter, L., Chapin III, S. F., Fleming, P., Ruffo, S., Stults, M., McNealey, S., Nasley, E., Verduzco, L. (2013). A comprehensive review of climate adaptation in the United States: more tahn before, but less than needed. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(3): 361-406.
- Biesbroek, G. R., Swart, R. J., Carter, T. R., Cowan, C., Henrichs, T., Mela, H., Morecroft, M. D. et Ray, D. (2010). Europe adapts to climate change: Comparing National Adaptation Strategies. *Global Environment Change*, 20(3): 440-450.

- Boon, H. J., Brown, L. H., Tsey, K., Speare, R., Pagliano, P., Usher, K. et Brenton, C. (2011). School disaster planning for children with disabilities: a critical review of the literature. *International Journal of Special Education*, 26(3): 223-237.
- Bouchama, A., Dehbi, M., Mohamed, G., Matthics, F. et Shoukri, M. (2007). Prognostic factors in heat wave-related deaths: a meta-analysis. *Archives International Medicine*, 167(20): 2170-2176.
- Boucher, I. et Blais, P. (2010). *Le bâtiment durable : guide des bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable*. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT), p. 10-40.
- Boulanger, P.-M. et Bréchet, T. (2003). *Une analyse comparative des classes de modèles: Modélisation et aide à la décision pour un développement durable*. Document d'action de support PADD I, SSTC. Récupéré de <http://users.skynet.be/idd/documents/model/models200103.pdf>.
- Boulfroy, E., Khaldoune, J., Grenon, F., Fournier R. et Talbot, B. (2013). *Conservation des îlots de fraîcheur urbains - Description de la méthode suivie pour identifier et localiser les îlots de fraîcheur et de chaleur (méthode en 9 niveaux)* (13-0679/EB/2014-07-04). CERFO et Université de Sherbrooke, p. 1-10.
- Bovar, O., Demotes-Mainard, M., Dormoy, C., Gasnier, L., Marcus, V., Panier, I. et Tregouët, B. (2008). Les indicateurs de développement durable. *Dossiers l'économie française*, p. 51-71.
- Breen, S.-P. (2008). Renewable Energy – Exploring Options for Farmers, Rural Landowners, and Rural Communities. *Plan*, p. 34-35.
- Brubaker, M., Berner, J., Bell, J., Warren, J. et Rolin, A. (2010). *Climate change in Point Hope, Alaska: Strategies for community health* (AN08-X59). Alaska Native Tribal Health Consortium Center for Climate and Health, 41 p.
- Bruxelles. Commission des communautés européennes (CCE). (2009, 01 avril). *Livre Blanc - Adaptation au changement climatique en Europe: vers un cadre d'action européen*. [Document PDF]. Rapport déposé le 01 avril 2009 à la Commission des communautés européennes. Bruxelles: Belgique, 17 p. Récupéré le 22 août 2013 de http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC-livre_blanc.pdf.

- Bureau de Normalisation du Québec (BNQ). (2013). *Lutte aux îlots de chaleur urbains – Aménagement des aires de stationnement : Guide à l'intention des concepteurs* (BNQ 3019-190/2013). Québec: BANQ, p. 1-14, 32.
- Burghard, C. M., Sven, R. et Wolfgang, L. (2010). Climate change and spatial planning. *Landscape and Urban Planning*, 98(3-4): 139-220.
- Cantat, O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191(2): 75-102. Récupéré de <http://norois.revues.org/1373>.
- Carmin, J., Nadkarni, N. et Rhie, C. (2012). *Progress and challenges in urban climate adaptation planning: results of a global survey*. Cambridge (MA): MIT, 30 p.
- Carmin, J., Dodman, D. et Chu, E. (2013). *Urban climate adaptation and leadership: From conceptual understanding to practical action*. OECD Regional Development Working: OECD Publishing, 48 p. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1787/5k3ttg88w8hh-en>.
- Carter, J. G. (2011). Climate change adaptation in European cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3): 193-198.
- Causley, D. (2008). Planning, politics and climate change: research results. *Plan*, 45-47.
- Chan, C. F., Lebedeva, J., Otero, J. et Richardson, G. (2007, 14 décembre). *Urban Heat Islands : a climate change adaptation strategy for Montreal*. 78 p. Récupéré de <http://www.mcgill.ca/files/urbanplanning/2008UHIFinalReportCCAP.pdf>
- City of Keene et ICLEI. (2007). *Adapting to Climate Change: Planning a Climate Resilient Community*. Keene, New Hampshire, 65 p.
- Coffee, J. E., Parwen, J., Wagstaff, M. et Lewis, R. S. (2010). Preparing for a changing climate: The Chicago climate action plan's adaptation strategy. *Journal of Great Lakes Research*, 36(2): 115-117.
- Colombert, M. et Boudes, P. (2012). Adaptation aux changements climatiques en milieu urbain et approche globale des trames vertes - Propos introductifs. *Vertigo*, Hors-série, 10 p.
- Commissariat Général du Plan (CGP). (2004). *La méthode des scénarios, outil d'une démarche prospective*, Les Dossiers d'ALEPH, no 1, 16 p.

- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2005). *Cap sur le monde : pour une région métropolitaine de Montréal attractive – Projet de schéma métropolitain d'aménagement et de développement*. Montréal: CMM, 133 p.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2010a). *Portrait des émissions de gaz à effet de serre sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal*. Montréal: AECOM Tecscult Inc., p. 1-11.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2010b). Portrait du Grand Montréal Édition 2010, *Cahiers métropolitains*, no 1, 56 p.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2010c). *Portrait statistique des activités et du territoire agricoles de la Communauté métropolitaine de Montréal*. Montréal: CMM, p. 7, 9.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2010d). *Une communauté et son fleuve*. Communauté métropolitaine de Montréal, p. 3; 7.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2011a). *Espaces bleus : Fonds bleu – Bilan de la période 2002-2009, Plans d'actions pour l'accessibilité aux rives et aux plans d'eau du Grand Montréal bleu*. Montréal: CMM, 22 p.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2011b). *Les formes d'habitat et la planification des densités résidentielles*. Récupéré de http://projet.pmad.ca/fileadmin/user_upload/pmad2011/documentation/20110309_formesHabitat.pdf, p. 4, 12, 16.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2012a). *L'occupation optimale et la vitalité du territoire du Grand Montréal par le plan métropolitain d'aménagement et de développement*. Montréal: CMM, p. 4-8.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2012b). *Un Grand Montréal attractif, compétitif et durable. Plan métropolitain d'aménagement et de développement*. Montréal: CMM, 221 p.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2013a). Bilan 2013 de la mise en œuvre du PMAD. *Cahiers métropolitains*, no 2, 44 p.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2013b). *Mission, organisation et compétences*. Montréal: CMM, 16 p.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2014a). *Document de*

présentation. Montréal: CMM, 48 p. Récupéré de http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/documents/briefingbook.pdf.

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2014b). État des lieux concernant les limites territoriales du Grand Montréal. *Cahiers métropolitains*, no 4, 56 p.

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2014c). *Rapport d'activités 2012 – Garder le cap*. Montréal: CMM, p. 5, 30-31.

Corfee-Morlot, J., Kamal-Chaoui, L., Donovan, M. G., Cochran, I., Robert, A. et Teasdale, P.-J. (2009). *Cities, Climate Change and Multilevel Governance*. O ECD Regional Development Working: OECD Publishing, no 14, 126 p. Récupéré de <http://www.oecd.org/governance/regional-policy/44232263.pdf>.

Côté, M.-J., Poulin, G., Prével, C., Saint-Onge, B. et Waaub, J.-P. (2001). Un système intégré d'aide à la décision pour gérer le territoire en tenant compte des dimensions environnementale et participative du développement durable. Le cas du SIAD Outaouais, Québec, Canada. *Géocarrefour*, 76 (3): 253-264.

Côté, G., Waaub, J.-P. et Mareschal, B. (2015, 29 avril). Évaluation des impacts sur l'environnement en péril. La nécessité d'agir. *Les cahiers du GERAD*, 26 p.

de Jouvenel, H. (2002). La démarche prospective: un bref guide méthodologique. *Futuribles*, 247, 24 p.

de Jouvenel, F. (2009). La prospective des territoires urbains sensibles: la construction des scénarios, et quelques autres méthodes, *Futuribles*, p. 1-43.

de Rosnay, J. (1975). *Le microscope Vers une vision globale*. Paris: Seuil, 314 p.

Delacour, E. (2013, 09 juillet). *En apprendre plus sur les îlots de chaleur*. 24h Montréal. Récupéré de <http://www.24hmontreal.canoe.ca/24hmontreal/actualites/archives/2013/07/20130709-090705.html>.

Deny, C., Gaumont, C., Caron, E., Touil, D. et Tremblay, S. (2007). *Projet de lutte aux îlots de chaleur urbains: le verdissement montréalais pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique*. Montréal: Conseil Régional de l'Environnement de Montréal (CRE-M), 83 p.

Deny, C., Gaumont, C., Salerno, D. et Chorlay, Y. (2008). *Matériaux réfléchissants*

et perméables pour contrer les îlots de chaleur urbains. Montréal: Conseil Régional de l'Environnement de Montréal (CRE-M), 20 p.

Desjarlais, C., Bourque, A., Décoste, R., Demers, C., Deschamps, P., Lam, K.-H., Allard, M., Campagna, M., Roy, R., Morneau, F., Lease, N., Dubé, M.-C., Plamondon, M., Cantin, J.-F., Morin, J., Rousseau, A. N., Paré, D., Noël, N., Gosselin P., Lin, C., Bryant, C., Caya, D., Fraser, R., Gachon, P., Saint-Gelais, J., Vescovi, L. et Slivitsky, M. (2004). *Ouranos. S'adapter aux changements climatiques*. Montréal: Consortium Ouranos, 85 p.

Desjarlais, C., Allard, M., Bélanger, D., Blondlot, A., Bouffard, A., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Pham, A. T., Roy, R., Savard, J.-P., Turcotte, R. et Villeneuve, C. (2010). *Ouranos. Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Montréal: Consortium Ouranos, 128 p.

Destatte, P. (2011, novembre). Du diagnostic aux scénarios exploratoires, mise en prospective des enjeux du SDER, Dans P. Destatte (dir.). *Colloque de la CPDT Territoires wallons: horizon 2040*. Actes du colloque, 21 et 22 novembre 2011, Liège, Wallonie. Liège: CPDT, Conférence Permanente du Développement Territorial.

Direction de grands parcs et du verdissement (DGPV). (2012). *Plan d'action canopée 2012-2021*. Montréal: Ville de Montréal, 12 p.

Drouet, A. (2009). Financer l'adaptation aux changements climatiques. Ce que prévoit la Convection-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. *Étude Climat*, 17: 7-9.

Ecologic Institute, AEA group, ICLEI - Local Governments for Sustainability, European Secretariat et The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe (REC). (2013). *Adaptation au changement climatique: Instruments d'action pour l'adaptation des grandes villes et zones métropolitaines européennes au changement climatique* (QG-32.10.426-FR-C). Berlin/Vienne: Union européenne. Récupéré de <http://cor.europa.eu/en/documentation/studies/Documents/Adaptation-to-Climature-Change/FR.pdf>.

Environnement Canada. (2013). *Bulletin des tendances et des variations climatiques – Année 2012*. Archives. Récupéré le 13 novembre 2015 de <https://www.ec.gc.ca/adsc-cmda/default.asp?lang=Fr&n=77842065-1>.

Ercoskun, O. Y. (2012). *Green and ecological technologies for urban planning*:

- Creating smart cities*. Hershey (Pennsylvania): Information Science Reference, 384 p.
- Fernandez, H. et Deshaies, M.-È. (2011). *Conservation des îlots de fraîcheur : une boîte à outils à l'intention des municipalités*. Québec: Nature Québec, 90 p.
- Ferrari, S. et Point, P. (2003). *Eau et littoral : Préservation et valorisation de la ressource dans les espaces insulaires*. Ile de la Réunion: Éditeur Karthala, p. 89-97.
- Fonds d'action québécois pour le développement durable (FAQDD). (2012). *Mémoire sur le PACC 2013-2020*. 16 p. Récupéré de http://faqdd.qc.ca/public/pdf/Publications/Memoire_FAQDD_2012.02.27.pdf.
- France, Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). (2012). *La modélisation urbaine : de la représentation au projet*. France: DRI, 328 p. Récupéré de http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Ref-Modelisation_urbaine.pdf.
- France, Conseil Général Alpes-Maritimes (CGAM) et Agence de Déplacements et d'Aménagement des Alpes-Maritimes (ADAAM). (2010). *Plan Climat Territorial des Alpes-Maritimes : guide d'aménagement et d'urbanismes durable*. Alpes-Maritimes: CGAM, 174 p. Récupéré de http://www.territoires-durables-paca.org/files/20120725_Guideamenagementurbanismedurablecg06.pdf.
- France, Direction des Études, de la Prospective et de l'Évaluation (DÉPÉ). (2009). *Midi-Pyrénées demain : Les scénarios prospectifs du Schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire Midi-Pyrénées*. Région Midi-Pyrénées: DÉPÉ, 30 p.
- France, ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MÉDDTL). (2011). *1er Plan national d'adaptation au changement climatique : anticiper et agir*. Dossier de Presse, 20 p. Récupéré de http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2011-07-20_1er_Plan_Nal_Adapt-Chgt_Climatique-2.pdf.
- Francke, P. (2008). *Municipal Responses to Climate Change Emergencies - The Swedish and Danish cases*. Nordregio, 38 p.
- Füssel, H. M. (2007). Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustainability Science*, 2(2): 265-275.

- Gacogne, V. (2007). Les modèles de Dynamique des Systèmes : des outils pédagogiques pour une aide à la gouvernance des systèmes ?. Dans *Systémique et accompagnement*. France: Université de Pau, Association Française de Science des Systèmes, 9 p. Récupéré de <http://www.res-systemica.org/afscet/resSystemica/Pau-2006/GacogneTXT.pdf>.
- Gagnon, C., Lussier, D., Beauchesne, N., Dumais, F., Haf, R., Lapierre, P., Miller, F., Larrivée, T. et Studio de design graphique. (2010). *Le plan de développement durable de la collectivité montréalaise 2010-2015 : ensemble pour une métropole durable*. Ville de Montréal, Québec, p. 62-66.
- Gallez, C., et Maksim, H.-N. (2007). À quoi sert la planification urbaine?: Regards croisés sur la planification urbaine – transport à Strasbourg et à Genève. *Métropolis Flux*, 69: 49-62.
- Gauthier, M., Simard, L. et Waaub, J.-P. (2011). Public participation in strategic environmental assessment (SEA): Critical review and the Quebec (Canada) approach. *Environmental Impact Assessment Review*, 31(1): 48-52.
- Geertman, S. et Stillwell, J. (2004). Planning support system: an inventory of crurent practices. *Computers, environment and urban systems*, 28(4): 291-293.
- Gérard, F.-M. (2010). L'évaluation des compétences par des situations complexes. Dans Baillat, G., Nicolot, D. et Ulma, G. (dir.), *La formation des enseignants en Europe (p. 231-241)*. Bruxelles: De Boeck.
- Giguère, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Québec: Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), 77 p. Récupéré de https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988_MesuresIlotsChaleur.pdf.
- Gillet, M. (2009). La place de l'adaptation dans la politique climatique. *Responsabilité & Environnement*, 56: 53-55.
- Greene, K. et Robichaud, A. G. (2010). *Climate change adaptation action plan for Stratford, P.E.I.* Canada: Île-du-Prince-Édouard, p. 3-23, 36-43. Récupéré de <https://www.cip-icu.ca/Files/Resourcess/CCMAP-TOWN-OF-STRATFORD-COMPLETE>.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques. Quatrième rapport d'évaluation*. Genève: Suisse, 103 p.
- Hajat, S., O'Connor, M. et Kosatsky, T. (2010). Health effects of hot weather: from

awareness of risk factors to effective health protection. *Lancet*, 375(9717): 856-863.

- Hallegatte, S., de Perthuis, C. et Lecocq, F. (2010, février). *Économie de l'adaptation au changement climatique*. Récupéré de <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/001-3.pdf>, 89 p.
- Harvey, R. (2012, 14 avril). L'AMT remet en question la non-électrification de tout le réseau. *Le Devoir*. Récupéré de <http://www.ledevoir.com/societe/actualites-en-societe/347346/l-amt-remet-en-question-la-non-electrification-de-tout-le-reseau>.
- Houet, T., Hubert-Moy, L. et Tissot, C. (2007). Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique – Application à la gestion de l'Eau en Bretagne. *Revue Internationale de Géomatique*, 18(3): 345-373.
- Houle, C. (2009). *Évolution de l'occupation du sol du territoire de l'île de Montréal entre 1989 et 2001 et ses effets sur la formation d'îlots de chaleur*. Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec À Montréal, 124 p.
- Institut canadien d'information sur la santé (ICIS). (2011). *Environnements physiques en milieu urbain et inégalités en santé*. Ottawa (Ont.), 100 p.
- Institut d'aménagement et d'urbanisme Île-de-France (IAU ÎdF). (2010a). *Les îlots de chaleur urbains – L'adaptation de la ville aux chaleurs urbaines*. Île-de-France, 81 p.
- Institut d'aménagement et d'urbanisme Île-de-France (IAU ÎdF). (2010b). *Les îlots de chaleur urbains – Répertoire de fiches connaissance*. Île-de-France, 58 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014a). *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1132 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014b). *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1132 p.
- King County. (2012). *Strategic Climate Action Plan – What King County is doing to*

reduce greenhouse gas emissions and prepare for the impacts of climate change. King County, 56 p.

Lachance, G. (2005). *Prototype d'évolution de la dynamique entre l'intensité thermique estivale, la population et les composantes du tissu urbain en milieu résidentiel à Montréal.* Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec À Montréal, 87 p.

Lachance, G., Baudouin, Y. et Guay, F. (2006). *Étude des îlots de chaleur montréalais dans une perspective de santé.* Québec: Institut National de la Santé Publique du Québec (INSPQ). Récupéré de <https://www.inspq.qc.ca/bise/etude-des-ilots-de-chaaleur-montrealais-dans-une-perspective-de-sante-publique>.

Lareau Carpentier, F. (2012). *Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la chaleur dans l'agglomération de Montréal.* Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 108 p.

Lavaud, J. et ARPE Midi-Pyrénées. (2011). *Volet « profil climat » pour les Plans Climat énergie Territoriaux (PCeT) de Midi-Pyrénées : l'adaptation des territoires aux changements climatiques.* Document de travail, p. 2, 11.

Le Moigne, J.-L. (1987). Qu'est-ce qu'un Modèle ?. *Confrontations psychiatriques*, Hors-série, 21 p. Récupéré de <http://archive.mcxapc.org/docs/ateliers/lemoign2.pdf>.

Lebel, G., Bustinza, R. et Gosselin, P. (2011). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur au Québec – Bilan de la saison estivale 2010.* Québec: INSPQ, p. 43.

Leduc-Frenette, S. (2012, 18 juillet). *Indice de canopée : sept recommandations pour l'arrondissement. Métro.* Récupéré de <http://journalmetro.com/local/riviere-des-prairies/actualites/628043/indice-de-canopee-sept-recommandations-pour-larrondissement/>.

Lemmen, D. S., Warren, F. J., Barrow, E., Schwartz, R., Andrey, J., Mills, B. et Riedel, D. (2004). *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne.* Ottawa (Ontario), 219 p.

Lemmen, D. S., Warren, F. J., Lacroix, J. et Bush, E. (2008). *Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007.* Ottawa (Ontario), 448 p.

Locatelli, B. (2010). *Local, global: intégrer atténuation et adaptation. Perspective*

Forêts/Changement climatique, no 3, 4 p.

- Loinger, G. et Spohr, C. (2004). « Prospective et planification territoriales: état des lieux et propositions », Préf. de Godet Michel, Ed. La Défense: Centre de prospective et de veille scientifique, 164 p.
- M. A. (2012, 01 juin). Sécheresse : le Rhône déjà sous surveillance. *Lyon News*. Récupéré de http://lyonnews.com/news_detail_63.html.
- Malone, E. L., Izaurralde, R. C., Thomson, A. M. et Morgan, L. G. (2009). Resilience, climate change, and security: modeling the connections, *Association for the Advancement of Artificial Intelligence*, p. 76-81.
- Mansanet-Bataller, M. (2010). Les enjeux de l'adaptation aux changements climatiques. *Etude Climat*, no 21, 28 p.
- Martin, P. (2008). *Analyse diachronique du comportement thermique de Montréal en période estivale de 1984-2005*. Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec À Montréal, 114 p.
- Massiah, G. et Tribillon, J.-F. (1985). Les différents visages de la planification urbaine. *Politique Africaine*, no 17, p. 8-19.
- Merahi, A. (2014). *Approche géomatique pour une classification de l'environnement urbain du Grand Montréal : dans un contexte d'îlots de chaleur urbains: rapport de stage*. [Document non publié]. Université du Québec À Montréal, 42 p.
- Merenne-Schoumaker, B. (1990). Villes du monde : similitudes et contrastes. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 26: 5-13.
- Mermet, L. (2004). Prospective: un objet d'étude pour les SIC. *Hermès*, 38: 207-214.
- Musy, M., Calmet, I., Bozonnet, E. et Rodriguez, F. (2012). Modélisation des Interactions ville-climat-énergie. Dans DRI du Commissariat Général au Développement Durable (dir.), *La modélisation urbaine : de la représentation au projet*, coll. Références, p. 16-33.
- Navarro, O., Forrest, F., Lavoisy, O. et Chanal, V. (2009). L'utilisation du scénario dans le processus d'innovation – Une lecture pluridisciplinaire. *Umanlab*, 54 p.
- New Hampshire Climate Change Policy Task Force. (2009). *The New Hampshire*

Climate Action Plan – A Plan for New Hampshire’s Energy, Environmental and Economic Development Future. New Hampshire: NHDES, 82 p.

- National Center for Environmental Health (NCEH). (2013). *Climate change and extreme heat events*. USA: CDCP, 20 p.
- New York City Panel on Climate Change. (2010). *Climate Change Adaptation in New York City: Building a Risk Management Response*. Annals of the New York Academy of Sciences, (1196): 1-354.
- Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC). (2012). *L'adaptation de la France au changement climatique. La documentation française*, 126 p.
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2012, juin). *L'avenir que nous voulons : Les villes. RIO+20 Conférence des Nations Unies sur le développement durable*. Actes de colloque, 20-22 juin 2012, Rio de Janeiro, Brésil. Récupéré de https://rio20.un.org/sites/rio20.un.org/files/a-conf.216-l-1_french.pdf.pdf.
- Ostry, A., Ogborn, M., Bassil, K. L., Takaro, T. K., et Allen, D. M. (2010). Climate change and health in British Columbia: projected impacts and a proposed agenda for adaptation research and policy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(3): 1018-1035.
- Ouranos. (2010). *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois*. Montréal, Québec, 48 p.
- Peaucelle, I. (2011). *Les théories de la planification et la régulation des systèmes économiques*. (PSE Working papiers no 2005-59). Paris: CNRS. Récupéré de <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00590766/document>.
- Perspective Grand Montréal. (2011). Les échanges migratoires entre le Grand Montréal et ses pourtours. *Bulletin de la Communauté métropolitaine de Montréal*, no 17, 8 p.
- Perspective Grand Montréal. (2012). Le vieillissement de la population à la lumière du recensement 2011. *Bulletin de la Communauté métropolitaine de Montréal*, no 21, p. 1-3.
- Perspective Grand Montréal. (2013). Évolution de la composition des ménages et du logement dans le Grand Montréal. *Bulletin de la Communauté métropolitaine de Montréal*, no 22, p. 5.

- Phalatse, L. et Mbara, G. (2009, juin). *Impacts of climate change and vulnerable communities at the city of Johannesburg*. Fifth Urban Research Symposium, 28 au 30 juin, Marseille, France, 9 p.
- Picketts, I. (2010). *Community adaptation to climate change : an exploration of climate change adaptation planning in British Columbia*. Thèse de doctorat, Colombie Britannique, Université de la Colombie Britannique du nord, 162 p.
- Pineau, P-O. (2013, 15 octobre). Des Idées en revues – L'électrification des transports, fausse bonne idée à court-circuiter. *Le Devoir*. Récupéré de <http://www.ledevoir.com/politique/quebec/389958/l-electrification-des-transports-fausse-bonne-idee-a-court-circuiter>.
- Pivetta, M. (2012, octobre). Îlot de chaleur urbain en Amazonie. *Pesquisa FAPESP*. Récupéré de <http://revistapesquisa.fapesp.br/fr/2013/08/21/ilot-de-chaleur-urbain-en-amazonie/>.
- Québec, ministère des Affaires Municipales et de la Métropole (MAMM). (2001, juin). *Une vision d'action commune : Cadre d'aménagement et orientations gouvernementales. Région métropolitaine de Montréal 2001-2021*, [Document PDF]. Québec: Gouvernement du Québec, 173 p. Récupéré de http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/cmm_cadre_amenagement.pdf.
- Québec, ministère des Affaires Municipales et des Régions (MAMR). (2005). *Les orientations du gouvernement en matière d'aménagement du territoire – Communauté métropolitaine de Montréal*. Québec: Gouvernement du Québec, 173 p.
- Québec, ministère des Affaires Municipales et des Régions (MAMR). (2007). *Rapport sur la mise en œuvre sur la Loi de la Communauté métropolitaine de Montréal*. Québec: Gouvernement du Québec, 44 p.
- Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2008). *Plan d'action 2006-2012 – Le Québec et les changements climatiques : Un défi pour l'avenir*. Québec: Gouvernement du Québec, 54 p.
- Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2012a). *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques – Phase 1: Le Québec en action vert 2020*. Québec: Gouvernement du Québec, 66 p.
- Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

- (MDDEP). (2012b). *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020 – Le Québec en action vert 2020*. Québec: Gouvernement du Québec, 52 p.
- Quenault, B. (2012). Mondialisation, mutations urbaines et vulnérabilité au changement climatique : quelles stratégies de résilience pour un développement urbain durable ?. Dans Hamdouch A., Deprêt M.-H., Tanguy C. (dir.), *Mondialisation et résilience des territoires: Trajectoires, dynamiques d'acteurs et expériences locales*. Québec: Presses de l'Université du Québec.
- Ribeiro, M., Losenno, C., Dworak, T., Massey, E., Swart, R., Benzie, M. et Laaser, C. (2009). *Design of guidelines for the elaboration of regional climate change adaptation strategies*. Vienne: Ecologic Institute, 91 p.
- Richardson, G. R. A. et Otero, J. (2012). *Outils d'aménagement locaux pour l'adaptation aux changements climatiques*. Québec: Gouvernement du Québec, 48 p.
- Riguelle, S. (2009). *La dynamique des systèmes – Principes, applications et introduction à la programmation dynamique*. Séminaire (cours FORE0015-1 GF 211), Université de Liège, France. Récupéré de <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/148362>.
- Risse, N. (2004). *Évaluation environnementale stratégique et processus de décision publics : contributions méthodologiques*. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire (IGEAT), p. 1-55.
- Rosenzweig, C., Demong, K., Stults, M., Major, D. C., Santon, C. et Horton, R. (2007). Managing climate change risks in New York City water system: assessment and adaptation planning. *Mitigation and Adaptation Strategy of Global Change*, 12: 1391-1409.
- Roy, L.-A., Price, K., Pâquet, M., Vida, S., Senécal, G., Lefebvre, L., Perron, S., King, N., Ratnayake, R. et Lampron-Goulet, É. (2011). *Canicule 2010 à Montréal – Rapport du directeur de la santé publique*. Montréal: ASSSM, p. iii, 1, 6, 25, 27-28.
- Rullier, F. (2012). *La place du paysagiste en ville dans un contexte de réchauffement global. La question des îlots de chaleur urbains, application à Montréal*. Mémoire de maîtrise, Agrocampus Ouest CFR Angers, 51 p.

- Saint-Amour, M., Charbonneau, A. B. et André, D. (2015). Coup d'œil sociodémographique – La population des régions administratives, des MRC et des municipalités au Québec en 2014. *Institut de la Statistique du Québec*, no 36, 10 p.
- Salcioglu, E., Basoglu, M. et Livanou, M. (2007). Post-traumatic stress disorder and comorbid depression among survivors of the 1999 earthquake in Turkey. *Disasters*, 31(2): 115-129.
- Samoura, K. (2011). *Contributions méthodologiques à l'évaluation environnementale stratégique de l'exploitation du potentiel hydroélectrique des bassins côtiers en milieu tropical : cas du Konkuré, en Guinée*. Thèse de doctorat, Montréal, Université du Québec À Montréal, p. 44; 57.
- Sanders, L. (2006). Les modèles agents en géographie urbaine. Dans *Modélisation et simulation multi-agents; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Editions: Amblard, F., Phan D., p. 151-168.
- Scherrer, B. (1984). *Biostatistique*. Chicoutimi: Gaëtan Morin, p. 593-811.
- Shaw, R., Colley, M. et Connell, R. (2007). *Climate change adaptation by design: a guide for sustainable communities*. Londres: TCPA, p. 2-17. Récupéré de http://www.tcpa.org.uk/data/files/bd_cca.pdf.
- Simonet, G. (2011). *Enjeux et dynamiques de la mise en œuvre de stratégies d'adaptation aux changements climatiques en milieu urbain : le cas de Montréal et de Paris*. Thèse de doctorat, Montréal, Nanterre, Université du Québec À Montréal, Université Paris Ouest Nanterre La Défense, 301 p.
- Smit, B. et Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16: 282; 289.
- Smith, J., Lavender, B., Smit, B. et Burton, I. (2001). Stratégies d'adaptation en vue de réduire la vulnérabilité des Canadiens aux changements climatiques. *Isuma*, p. 70-78.
- Smith, D. (2009). *Gestion des écosystèmes*. Parcs Canada, Gouvernement du Canada. Récupéré le 20 mai 2014 de <http://www.pc.gc.ca/fra/progs/np-pn/eco/eco5.aspx>.
- Soares, I., Vandroux, B. et Magalon, N. (2010). *Les thématiques : Lutte contre les îlots de chaleur urbains – Référentiel conception et gestion des espaces publics*. Lyon: Grand Lyon communauté urbaine, 6 p.

- Somasundaram, D. J. et Van De Put, W. A. (2006). Management of trauma in special populations after a disaster. *Journal of Clinical Psychiatry*, 67(2): 64-73.
- Stewart, I. D. et Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of American Meteorological Society*, 93:1880-1900. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- Sussman, E. (2009). Case study: climate change adaptation planning guidance for local governments in the United States. *Sustainable Development Law & Policy*, 9(2): 31-35, 71.
- Swinomish Indian Tribal Community. (2010). *Swinomish climate change initiative: Climate adaptation action plan*. USA: Office of Planning and Community Development, 144 p.
- Tairou, F. O., Bélanger, D. et Gosselin, P. (2010). *Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés à la chaleur*. Québec: INSPQ, 55 p.
- The Intergovernmental Committee on Urban and Regional Research (ICURR). (2008). Climate change: Canadian Cities are doing their share. *Plan*, p. 21.
- Trottier, A. (2007). *Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel – Étude de cas : UQAM*. Rapport de stage. Université du Québec À Montréal, 84 p.
- University of Oregon et U.S. Department of Agriculture. (2010). *Pacific Northwest Station*. USA: USDA Forest Service, 2 p.
- Van der Maren, J.-M. (2003). *Méthodes de recherche pour l'éducation* (2e éd.). Belgique: De Boeck, 503 p.
- Velazquez, L. S. (2005). Organic greenroof architecture : sustainable design for the new millenium. *Environmental quality management*, p. 73-85.
- Ville de Montréal. (2013). *Mémoire de la Ville de Montréal présenté dans le cadre des consultations de la Commission itinérante sur les enjeux énergétiques du Québec*. Montréal: Ville de Montréal, p. 10, 12-13. Récupéré de https://www.mern.gouv.qc.ca/energie/politique/memoires/20131011_378_Ville_Montreal_M.pdf.
- Vincent, L. A., Wang, X. L., Milewska, E. J., Wan, H., Yang, F. et Swail, V. (2012). A second egeneration of homogenized Canadian monthly surface air

temperature for climate trend analysis. *Journal of Geophysical Research*, 117, 13 p. <http://dx.doi.org/10.1029/2012JD017859>.

Waub, J.-P. (2012). Fondements théoriques et approches méthodologiques de l'Évaluation Environnementale Stratégique (EES). Dans Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie (IEPF), *Évaluation environnementale stratégique et citoyenneté à la recherche de modèles adaptés de développement durable*, no 91, p. 9-10.

Warren, F. J. et Lemmen, D. S. (2014). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Ottawa (Ontario), 286 p.

Williams, T. (2009). *Le changement climatique : Adaptation (PRB 08-47F)*. Canada: Bibliothèque du Parlement, 12 p. Récupéré de <http://www.parl.gc.ca/Content/LOP/researchpublications/prb0847-f.pdf>.

Zagamé, P. (1993). Planification stratégique. Quelques réflexions pour une transposition à la planification nationale. *Revue économique*, 44(1): 13-56.

ENTREVUES

Baudouin, Y. (2014, 28 mai, 19 juin, 14 juillet). Entrevue avec Yves Baudouin: Les îlots de chaleur urbains sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal.

Larrivée, C. (2013, 11 juillet). Entrevue avec Larrivée Caroline: Le cadre législatif de l'adaptation aux changements climatiques au Québec.

Paquet, S. (2014, 26 juin). Entrevue avec Serge Paquet: Le traitement des données.

Plouhinec, J.-B. (2014, 16 et 23 mai, 06, 13 et 27 juin, 18, 24 et 31 juillet, 12 août). Entrevue avec Jean-Baptiste Plouhinec: La modélisation du système par le logiciel Stella.

Waub, J.-P. (2013, 10 juillet, 02 août et 23 décembre). Entrevue avec Jean-Philippe Waub: La proposition de recherche.

SITES INTERNET

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2012). *Adaptation au changement climatique : 12 fiches pour agir dans les collectivités locales*. France: ADEME. Récupéré le 20 septembre de

<http://www.languedoc-roussillon.ademe.fr/sites/default/files/files/Mediatheque/Publications/fiches-adaptation-changement-climatique.pdf> .

Alcaras, J.-R. et Lacroux, F. (2013). *Planifier, c'est s'adapter*. Récupéré le 08 mai de <http://archive.mcxapc.org/docs/ateliers/padapte.htm>.

Borcard, D. (2008). *Formules utiles pour la régression linéaire simple et la corrélation de Pearson*. Récupéré le 17 juin de http://biol09.biol.umontreal.ca/BIO2042/Formules_regression.

Centre des ressources Pour les Plans Climat-Energie territoriaux (PCET). (2013). *Adaptation au changement climatique – Clarification des concepts*. France: ADEME. Récupéré le 08 mai de <http://www.pcet-ademe.fr/content/adaptation-au-changement-climatique-1>.

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2015a). *Cartes PDF*. Récupéré le 05 novembre de <http://cmm.qc.ca/donnees-et-territoire/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/cartes-pdf/>.

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2015b). *La CMM en chiffres*. Récupéré le 15 septembre de http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/documents/20151109_CMM-en-chifres.pdf.

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2015c). *PMAD – Orientation 2 : Un Grand Montréal avec des réseaux et des équipements de transport performants et structurants*. Récupéré le 28 avril de <http://cmm.qc.ca/champs-intervention/amenagement/plans/pmad/orientation-2-du-pmad-volet-transport/>.

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2015d). *PMAD – Plan métropolitain d'aménagement et de développement*. Récupéré le 28 juin de <http://pmad.ca/>.

Direction de l'information légale et administrative (DILA). (2008a). *Négociations sur le climat : l'Union européenne parlera-t-elle d'une seule voix ?*. Récupéré le 07 octobre de <http://www.vie-publique.fr/actualite/dossier/climat-union-europeenne/negociations-climat-union-europeenne-parlera-t-elle-seule-voix.html>.

Direction de l'information légale et administrative (DILA). (2008b). *Paquet "Énergie Climat" : repères chronologiques*. Récupéré le 07 octobre de

<http://www.vie-publique.fr/chronologie/chronos-thematiques/paquet-energie-climat-reperes-chronologiques.html>.

Esperoir Régional de Santé Publique (ERSP). (2009). *Étape_3 : Planification de l'évaluation : questions, critères et indicateurs*. Récupéré le 30 juin de http://www.ersp.org/elearning/etape_3.asp?case=1.

Environnement Canada. (2012). *Impliquez-vous !*. Récupéré le 15 mai de <http://www.ec.gc.ca/envirozine/default.asp?lang=Fr&n=3D5D530C-1>.

Gacogne, V. (2003-2014). *Dynamique des systèmes: quelques éléments en Modélisation*. Récupéré le 31 août, 20 mai de http://www.complexio.eu/pages/dynamiquesystemes_complexio.html.

Gouvernement du Canada. (2013). *L'action du Canada sur les changements climatiques*. Récupéré le 16 octobre de <http://www.climatechange.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=65CD73F4-1>.

Green et vert. (2013). *Les températures dépassent le rouge en Australie*. Récupéré le 20 mai de <http://www.greenetvert.fr/2013/01/16/les-temperatures-depassent-le-rouge-en-australie/70848>.

INSPQ. (2001-2010). *Îlots de chaleur urbains*. Mon climat, ma santé. Récupéré le 03 septembre de <http://www.monclimatmasante.gc.ca/%C3%AEIlots-de-chaleur.aspx>.

Institut Canadien de Recherches Avancées (ICRA). (2013). *Scénarios et Stratégies – Concepts-clés*. Consulté en ligne le 15 avril 2013. Récupéré de <http://www.icra-edu.org/objects/francolearn/Scenstratcon.pdf>.

ISEE systems. (2013). *STELLA: Systems Thinking for Education and Research*. Récupéré le 04 mars de http://www.aertia.com/docs/isee/STELLA_productsheet.pdf.

Kunsch, P. L. (2014). *La Dynamique des Systèmes (DS) un outil pour les politiques de l'environnement*. Récupéré le 13 juin de <http://homepages.ulb.ac.be/~bmaresc/DynSysPK.pdf>.

Les Crises. (2013). *1380 Météo de la banquise arctique – Juin 2013*. Récupéré le 20 mai de <http://www.les-crisis.fr/meteo-banquise-arctique/>.

Marchadier, C. (2013). *Présentation générale du projet MUSCADE*. Centre National

de Recherches Météorologiques (CNRM). Récupéré le 09 mars de <http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/spip.php?article84>.

Météomédia. (2014). *Météo actuelle*. Récupéré le 05, 11, 20 juin et 15 juillet de <http://www.meteomedia.com/>.

Nature Québec. (2014). *Agriculture urbaine et îlots de fraîcheur*. Récupéré le 20 mars de http://www.agricultureurbaine.net/wp-content/uploads/2013/02/FI11-03-10_FetesSemences_web.pdf.

Stics. (2014). « 9 – Déterminer les indicateurs d'évaluation ». In *Construire et gérer son projet*, Commission communautaire française, Cridis, cahier no 1. Récupéré le 30 juin de http://www.stics.be/evaluer/fi/f10.htm#_ftn1.

Université Joseph Fourier. (2014). *Transfert de chaleur*. Récupéré le 25 avril de http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/TTE/DocsTTE/L3P/transfert_chaleur.pdf.

U.S. Global Change Research Program (USGCRP). (2014). *What we do - Assess the U.S. Climate*. GlobalChange.gov. Récupéré le 10 septembre de <http://www.globalchange.gov/what-we-do/assessment>.