

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

MODÉLISATION DE L'INFLUENCE DES ARBRES SUR LE STRESS
THERMIQUE EN MILIEU URBAIN MONTRÉALAIS

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR
VICTOR SOUBRY

JUIN 2022

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.04-2020). 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

Je tiens à commencer mon mémoire en mentionnant l'ensemble des personnes qui m'ont permis de terminer ma maîtrise. J'aimerais d'abord commencer par remercier mon directeur de maîtrise Yves Baudouin qui m'a proposé, il y a environ deux ans, un sujet de mémoire qui a su piquer ma curiosité. À cette époque, j'étais en questionnement sur mon parcours de vie et de carrière. Par contre, grâce à l'offre miraculeuse de Yves, j'ai trouvé une voie qui aujourd'hui me rassure de la direction de mon avenir. Je lui serai toujours reconnaissant pour cette offre qui a changé ma vie. Dans la même lignée, j'aimerais remercier l'Agence Spatiale canadienne qui a subventionné mon mémoire de maîtrise. Cette subvention a rendu mon mémoire l'épicentre de ma vie et ce sans avoir de soucis monétaires. Je voudrais également remercier mon codirecteur de maîtrise Philippe Gachon qui peaufiné et amélioré mon mémoire grâce son expertise légendaire. J'aimerais également remercier mes parents qui ont toujours été présents pour moi au courant de ma vie. Ils m'ont enseigné de ne jamais abandonner et de toujours essayer de dépasser ses limites. Je voudrais mentionner également mes collègues de bureau Ian et Jade qui ont rendu mon parcours beaucoup plus amusant et motivant. Les souvenirs que nous avons passés ensemble dans le local A-4150 seront gravés dans ma mémoire à jamais. Finalement, je ne pourrais pas faire de remerciements sans mentionner ma copine Virginie. Tu as toujours été là pour me remonter le moral et m'aider à surmonter les moments difficiles. La pandémie mondiale du COVID-19 a changé la routine de pratiquement l'ensemble des humains. Par contre, je n'aurais pas voulu passer le confinement avec personne d'autre. Mention spéciale à Attaboy et Pikachu les deux chats qui habitent avec nous depuis quelques mois qui rendent cette fin de pandémie beaucoup plus agréable.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES	ix
RÉSUMÉ	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE	5
1.1 Revue de littérature	5
1.1.1 Définition d’îlot de chaleur (ICU).....	5
1.1.2 Causes des ICUs.....	5
1.1.3 Les effets des ICUs	8
1.1.4 Quantifier l’influence des arbres grâce à la modélisation	9
1.2 Problématique	12
1.3 Présentation des objectifs.....	14
1.3.1 Objectif principal.....	14
1.3.2 Objectif secondaire 1	15
1.3.3 Objectif secondaire 2.....	16
1.3.4 Objectif secondaire 3.....	16
CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE.....	18
2.1 Zones d’étude.....	18
2.2 Présentation des données utilisées	23
2.2.1 Variables et indicateurs de la caractérisation des zones d’études	26
2.2.2 Variables et indicateurs spatiaux (topographie, surface et canopée)	28
2.2.3 Variables et indicateurs de la répartition et quantité de canopée ..	32
2.3 Traitement des données géospatiales.....	35
2.4 Modélisation et élaboration des scénarios d’aménagement.....	38
2.4.1 Fonctionnement du modèle estimant le confort thermique	38
2.4.2 Élaboration des scénarios d’arbres	40

2.5 Analyse des résultats.....	43
2.5.1 Analyse des cartes matricielles	44
2.5.2 Analyse des résultats POIs	46
CHAPITRE III : RÉSULTATS.....	48
3.1 Résultats de caractérisation du tissu urbain	48
3.2 Résultats de la modélisation.....	56
3.2.1 Scénarios d'aménagement d'arbres	56
3.2.2 Cartes de T_{mrt}	58
3.2.3 Résultats des POIs (<i>Points of interests</i>).....	67
CHAPITRE IV : INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION ..	84
4. 1 Influence de la canopée et du bâti :	84
4.1.1 Influence de la superficie de canopée :	84
4.1.2 Influence du cadre bâti :	84
4.1.3 Influence du positionnement des arbres :	86
4.1.4 Constats sur le FCV et le <i>Shadow Fraction</i> :	87
4.2 Recommandations quant aux aménagements d'arbre : .	Erreur ! Signet non défini.
4.2.1 Limites de <i>SOLWEIG</i> :	91
4.2.2 Validation des résultats du modèle :	92
4.2.3 Applicabilité :	93
CONCLUSION	95
BIBLIOGRAPHIE	98

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 L'effet du SVF sur la réduction des températures nocturnes (Hamdi, 2008, p.980)	7
Figure 2.1 Les deux zones d'études dans le contexte montréalais	19
Figure 2.2 Délimitation de la zone d'étude de Ville-Marie	20
Figure 2.3 Cadre bâti de la zone d'étude de Ville-Marie	20
Figure 2.4 Délimitation de la zone d'étude du Plateau Mont-Royal.....	21
Figure 2.5 Cadre bâti de la zone d'étude du Plateau Mont-Royal.....	21
Figure 2.6 Organigramme de l'ensemble des données nécessaire à l'exécution du modèle SOLWEIG	38
Figure 2.7 Organigramme du fonctionnement du modèle SOLWEIG	39
Figure 3.1 Facteur Ciel Vu de la zone du Plateau Mont-Royal	51
Figure 3.2 Facteur Ciel Vu de la zone de Ville-Marie.....	52
Figure 3.3 Shadow Fraction de l'ensemble de heures diurnes de la zone du Plateau Mont-Royal	53
Figure 3.4 Shadow Fraction des heures AM de la zone du Plateau Mont-Royal.....	53
Figure 3.5 Shadow Fraction des heures PM de la zone du Plateau Mont-Royal.....	54
Figure 3.6 Shadow Fraction de l'ensemble des heures diurnes de la zone de Ville- Marie.....	54
Figure 3.7 Shadow Fraction des heures AM de la zone de Ville-Marie.....	55
Figure 3.8 Shadow Fraction des heures PM de la zone de Ville-Marie.....	55
Figure 3.9 Points de plantation d'arbres fictifs de la zone du Plateau Mont-Royal.....	57
Figure 3.10 Points de plantation d'arbres fictifs de la zone de Ville-Marie	57
Figure 3.11 Carte de T_{mrt} sans présence d'arbres fictifs de la zone du Plateau Mont-Royal.....	58
Figure 3.12 Carte de T_{mrt} avec l'ensemble d'arbres fictifs de la zone du Plateau Mont-Royal	59
Figure 3.13 Carte de T_{mrt} sans présence d'arbres fictifs de la zone de Ville-Marie	59
Figure 3.14 Carte de T_{mrt} avec l'ensemble d'arbres fictifs de la zone de Ville-Marie	60

Figure 3.15 Graphique de T_{mrt} atténuée en relation avec la superficie de canopée en m^2 de la zone du Plateau Mont-Royal	63
Figure 3.16 Graphique de T_{mrt} atténuée en relation avec la superficie de canopée en m^2 de la zone Ville-Marie pour l'ensemble des scénarios d'aménagement	64
Figure 3.17 Carte de T_{mrt} atténuée moyenne quotidienne pour chacun des Pois de la zone du Plateau Mont-Royal	68
Figure 3.18 Carte de T_{mrt} atténuée moyenne quotidienne pour chacun des POIs de la zone de Ville-Marie.....	69
Figure 3.19 Carte du Facteur Ciel Vu des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal.....	72
Figure 3.20 Carte du Facteur Ciel Vu des POIs de la zone Ville-Marie	72
Figure 3.21 Graphique de la relation entre l'atténuation de la T_{mrt} quotidienne et le Facteur Ciel Vu (FCV) des Pois dans la zone du Plateau Mont-Royal..	74
Figure 3.22 Graphique de la relation entre l'atténuation de la T_{mrt} quotidienne et le Facteur Ciel Vu (FCV) des Pois dans la zone de Ville-Marie	74
Figure 3.23 Carte du Shadow Fraction moyen des Pois sur l'ensemble des heures diurnes dans la zone du Plateau Mont-Royal.....	75
Figure 3.24 Carte du Shadow Fraction moyen des POIs sur l'ensemble des heures diurnes dans la zone de Ville-Marie	76
Figure 3.25 Graphique de la relation entre l'atténuation quotidienne de T_{mrt} et le Shadow Fraction moyen des heures diurnes des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal	77
Figure 3.26 Graphique de la relation entre l'atténuation quotidienne de T_{mrt} et le Shadow Fraction moyen des heures diurnes des POIs de la zone de Ville-Marie.....	78
Figure 3.27 Carte du Shadow Fraction moyen des heures AM des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal.....	79
Figure 3.28 Carte du Shadow Fraction moyen des heures PM des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal.....	79
Figure 3.29 Carte du Shadow Fraction moyen des heures AM des POIs de la zone de Ville-Marie	80
Figure 3.30 Carte du Shadow Fraction moyen des heures PM des POIs de la zone de Ville-Marie	80
Figure 3.31 Graphique de la relation entre la T_{mrt} quotidienne atténuée et le Shadow Fraction moyen des heures AM des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal.....	81

Figure 3.32 Graphique de la relation entre la T_{mrt} moyenne quotidienne atténuée et le Shadow Fraction moyen des heures PM des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal	81
Figure 3.33 Graphique de la relation entre la T_{mrt} moyenne quotidienne atténuée et le Shadow Fraction moyen des heures PM des POIs de la zone de Ville-Marie	82
Figure 3.34 Graphique de la relation entre la T_{mrt} moyenne quotidienne atténuée et le Shadow Fraction moyen des heures PM des POIs de la zone de Ville-Marie	82
Figure 4.1 Températures enregistrées le 2 Juillet 2018 à la station ESCER	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Ensemble des outils et fonctions utilisés pour la modélisation..	24
Tableau 2.2 Ensemble des données utilisées pour la modélisation.....	25
Tableau 2.3 Résumé de l'objectif secondaire 1	28
Tableau 2.4 Résumé de l'objectif secondaire 2	32
Tableau 2.5 Résumé de l'objectif secondaire 3	35
Tableau 2.6 Ensemble des arbres urbains communs de Montréal et leur caractéristiques physiques.....	42
Tableau 3.1 Statistiques d'occupation du sol des zones d'études	49
Tableau 3.2 Statistiques du tissu urbain	50
Tableau 3.3 Tableau des moyennes quotidiennes de T_{mrt} des heures diurnes (5h30-20h30) du 2 Juillet 2018	61
Tableau 3.4 Tableau de réduction de T_{mrt} moyenne quotidienne des heures diurnes (5h30-20h30) du 2 Juillet 2018.....	62
Tableau 3.5 Superficie des canopées en m ² et Atténuation de T_{mrt} par m ² de canopée pour l'ensemble des scénarios d'aménagement des deux zones d'études	66
Tableau 3.6 Moyenne d'atténuation de T_{mrt} quotidienne des POIs en fonction de l'emplacement sur les tronçons routiers.....	71
Tableau 3.7 Moyenne d'atténuation de T_{mrt} (°C) quotidienne des POIs en fonction de la direction du tronçon routier	71
Tableau 3.8 Moyenne du Facteur Ciel Vu des POIs en fonction de l'emplacement sur les tronçons routiers.....	73
Tableau 3.9 Moyenne du Facteur Ciel Vu des POIs en fonction de la direction des tronçons routiers	73
Tableau 3.10 Moyenne du Shadow Fraction des POIs en fonction de la direction des tronçons routiers.....	76
Tableau 3.11 Moyenne du Shadow Fraction des POIs en fonction de la direction du tronçon routier	77

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

CDSM	<i>Canopy Digital Surface Model</i>
FCV	Facteur Ciel Vu
ICU	Îlot de Chaleur Urbain
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MNC	Modèle Numérique de Canopée
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
POIs	<i>Point Of Interests</i>
SIG	Système d'Information Géographique
SOLWEIG	Solar LongWave Environmental Irradiance Geometry
TDSM	<i>Trunk Digital Surface Model</i>
T_{mrt}	Température Médiane Radiante
UMEP	<i>Urban Multi-scale Environmental Predictor</i>

RÉSUMÉ

Les îlots de chaleur urbains ont pour effet d'augmenter les températures, en particulier durant la période estivale. Leurs effets varient selon les conditions de surface et engendrent des conséquences délétères pour les populations urbaines, notamment un accroissement de la mortalité lié au stress thermique durant les périodes de canicules. Il a été prouvé que les arbres permettent d'atténuer la chaleur de manière efficace. L'objectif de cette recherche est donc de mieux comprendre comment aménager les arbres afin que ceux-ci atténuent la température radiante médiane (T_{mrt}) de manière optimale dans les contextes urbains de Montréal. Pour ce faire, on utilise le système de modélisation radiatif *SOLWEIG* afin de simuler plusieurs scénarios d'aménagement d'arbres. Dans le but d'assurer la comparaison cohérente entre les scénarios proposés, l'ensemble de ceux-ci sont modélisés durant la même journée soit le 2 juillet 2018 (heures suivant/précédent le lever/coucher du soleil). Les arbres sont aménagés différemment en fonction de la position des axes routiers. De plus, les scénarios d'aménagement d'arbres sont modélisés avec les mêmes propriétés physiques afin d'isoler l'influence de leur positionnement sur la T_{mrt} . Un ensemble de 32 scénarios est réalisé avec des critères cohérents dans deux zones d'étude situées au centre-ville de Montréal, soit le Plateau Mont-Royal et Ville-Marie. La modélisation nous permet ensuite d'établir les différences entre les scénarios avec et sans arbres pour observer l'impact précis d'atténuation des arbres sur la T_{mrt} . Les résultats révèlent que les arbres peuvent atténuer de manière plus efficace lorsque ceux-ci sont situés sur des côtés Nord et Est des rues. De plus, les arbres qui atténuent davantage la T_{mrt} reçoivent le rayonnement solaire durant les heures diurnes d'après-midi (12h-20h30).

Mots clés : îlots de chaleur, stress thermique, aménagement, canopée urbaine.

INTRODUCTION

Depuis le début de la sédentarisation de l'homme, les territoires que nous nous approprions sont devenus des espaces de vie artificialisés qui s'éloignent grandement de leur état naturel original. Ces modifications apportées aux espaces s'avéraient nécessaires pour nourrir les peuples par l'implantation de champs afin de pratiquer l'agriculture, ou encore pour accélérer les déplacements entre les différentes régions par la construction de réseaux routiers. Celles-ci ont un grand impact sur les paysages terrestres et les bilans énergétiques modifiant notamment les températures de surface et de l'air sus-jacent (Oke, 1982). Elles ont permis d'atteindre la modernité de notre société actuelle où le territoire est modelé pour servir les besoins humains. Par contre, le rythme effréné avec lequel nous avons modifié le territoire dans les dernières décennies a des conséquences de plus en plus importantes sur les populations des grandes villes surtout dans le contexte des changements climatiques et l'évolution sociodémographique en cours et à venir.

Ces conséquences furent découvertes pour la première fois au début du XIX^e siècle par Luke Howard, un pharmacien qui avait pour loisir l'étude de la météorologie et la formation des nuages (Oke, 1982). Ce résident de Londres a décidé d'enregistrer la température de l'air à différents endroits de la ville et ses environs, afin potentiellement d'y observer des différences. Ses enregistrements lui firent constater que les températures à l'intérieur de Londres étaient plus élevées que celles en région dans les mêmes conditions météorologiques. Howard est le premier à avoir observé ce phénomène et au travers des années ce contraste thermique entre urbain et périurbain fut nommé îlot de chaleur urbain (Oke, 1982).

Les ICU (îlots de chaleur urbains) sont des phénomènes observables pratiquement dans toutes les zones urbanisées mondialement (Cantat, 2004). Ceux-ci peuvent engendrer des contrastes thermiques entre l'urbain et le rural de plus 10°C (Oke, 1982) ou au sein de la même ville selon les conditions de surface (Martin *et al.*, 2015). Cette température affectée par la présence des ICUs a également pour effet d'exacerber les vagues de chaleur (Tan *et al.*, 2010) qui sont plus fréquentes et plus intenses au fur et à mesure que le climat se réchauffe (IPCC, 2018).

Cette température plus élevée des centres urbains a des conséquences parfois mortelles sur les populations vulnérables, soit les personnes affectées par des maladies respiratoires et cardiovasculaires ou par des conditions socio-sanitaires précaires (Gachon *et al.*, 2016). Les températures extrêmes chaudes ont en effet des conséquences sur la morbidité et la mortalité (Chebana *et al.*, 2013 ; Watts *et al.*, 2015). Le stress thermique peut engendrer plusieurs maladies comme la syncope de chaleur créée par un manque de circulation sanguine qui diminue la pression artérielle et donc l'approvisionnement d'oxygène au cerveau (Kleppner *et al.*, 2012). Il génère également des coups de chaleur qui provoquent une perte de conscience pouvant créer un syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS), l'insuffisance rénale et du foie, et parfois, dans le pire des cas, la mort (Kleppner *et al.*, 2012). La mort causée par le stress thermique est loin d'être un phénomène rare. Ainsi aux États-Unis, durant la période 1999-2009, 658 personnes en moyenne sont mortes annuellement en raison de l'exposition à la chaleur extrême (Jungmin et Skimore, 2020). Au Québec, l'impact des îlots de chaleur a causé un excès de 86 morts, et ce au courant d'une seule vague de chaleur qui a duré entre fin juin et début juillet 2018 (BISE, 2018).

Il existe plusieurs manières d'atténuer la chaleur en ville et de réduire la présence des ICUs. Plusieurs études ont démontré que la présence d'arbres est un moyen efficace de contrer les effets des ICU (Dimoudi et Nikolopoulou, 2003 ; Spangenberg *et al.*, 2008 ; Streiling et Matzarakis, 2003). Notamment, une étude réalisée en Allemagne a conclu que la température radiante médiane (T_{mrt}) diminue de 7°C lorsqu'on est à proximité d'un arbre (Lee *et al.*, 2016). Une étude similaire réalisée à Bilbao en Espagne a obtenu des résultats similaires avec une différence de 10°C (Lobaccaro et Acero, 2015).

Ce pouvoir d'atténuation de la chaleur des arbres s'explique principalement en raison de deux facteurs. Premièrement en raison de l'évapotranspiration. Ce phénomène est généré par l'évaporation des surfaces humides et la transpiration des feuilles des arbres (Shasha-Bar *et al.*, 2011). Les arbres transpirent de l'eau lorsqu'ils sont en croissance (Kleporer *et al.*, 2012). Lorsque le rayonnement solaire entre en contact avec l'arbre, l'eau que l'arbre puise par son système racinaire dans le sol, passe de l'état liquide à gazeux (vapeur d'eau). Lors de ce changement de phase de l'eau, les feuilles des arbres et la surface se refroidissent par absorption de chaleur latente limitant ainsi le réchauffement de la surface (feuille et sol) dû à l'absorption de radiation solaire, ce qui limite l'augmentation la température de l'air sus-jacente (The Nature Conservancy, 2016). Une surface, par exemple une feuille d'arbre, qui évapore influence directement le bilan énergétique de surface, car l'énergie solaire incidente est convertie en chaleur latente et non en chaleur sensible, comme dans le cas des surfaces minéralisées (Mohajerani *et al.*, 2017). Deuxièmement, les arbres peuvent également atténuer la chaleur par l'ombre que ceux-ci procurent au sol. En effet, l'ombre des arbres a pour influence de réduire la quantité de radiation solaire d'ondes courtes arrivant en surface et ainsi réduire l'échange d'énergie radiative (ondes longues et flux infrarouges)

entre la surface et l'air en raison des endroits ombragés aux températures plus basses (Norton *et al.*, 2015).

Donc, sachant que les arbres atténuent les températures de surface et donc les effets des ICUs de manière efficace, il est important d'étudier comment les disposer afin de diminuer les températures de surface et de l'air lors des canicules ainsi que réduire les effets du stress thermique.

Dans la suite, ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre aborde une revue de la littérature ainsi que la problématique de la recherche. Le deuxième chapitre présente la méthodologie, soit une élaboration de l'ensemble des étapes de réalisation du projet ainsi que les méthodes d'analyse des résultats. Le troisième chapitre a pour objet la présentation des résultats, et par la suite le dernier chapitre s'attardera sur l'interprétation des résultats. Ce mémoire conclura sur une mise en perspective des résultats de recherche et des travaux à poursuivre ainsi que les retombées de notre étude.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE

1.1 Revue de littérature

1.1.1 Définition d'îlot de chaleur (ICU)

L'îlot de chaleur urbain (ICU), comme mentionné dans la section précédente, est un contraste thermique en les zones urbaines et périurbaines et peut être également défini comme étant : « une sorte de dôme d'air plus chaud couvrant la ville [...]. » (Cantat, 2004). Celui-ci est non seulement délimitable par sa localisation, mais également par son élévation, soit l'épaisseur du dôme de chaleur. Par cette délimitation par l'élévation, on peut classer l'ICU en deux catégories soit : l'ICU de canopée urbaine et l'ICU de surface. L'ICU de canopée urbaine se caractérise « [...] par une différence entre la température de la couche d'air à la hauteur moyenne des bâtiments en milieu urbain et la température de l'air en milieu rural dans les mêmes conditions météorologiques. » (BISE, 2014). L'ICU de surface lui est défini comme étant la différence entre la température de surface des milieux urbains et les milieux ruraux avoisinants (BISE, 2014).

1.1.2 Causes des ICUs

L'ICU est un phénomène qui est causé par une multitude de facteurs. L'une des causes les plus citées est la plus forte concentration de surfaces minéralisées en ville qu'en milieu rural. Les matériaux minéralisés ont emmagasiné plus de chaleur durant la journée et ont une conduction de chaleur plus importante que les surfaces végétalisées ce qui favorise des flux

de chaleur sensible plus élevés que dans le cas des surfaces végétales (Gachon *et al.*, 2016). Le faible albédo de certaines surfaces minéralisées fait en sorte que peu de rayonnement solaire est reflété et beaucoup est emmagasiné (Mohajerani *et al.*, 2017). Par exemple, il a été estimé que de l'asphalte fraîche absorbe 95% des rayonnements solaires et ce qui veut dire qu'elle a un albédo de seulement 5% (Pomerantz *et al.*, 2003). Au contraire, la végétation n'emmagasine pas ou peu de chaleur, mais utilise plutôt les rayonnements solaires pour la photosynthèse et l'évapotranspiration (Abreu-Habrich *et al.*, 2015). Cela a pour effet d'influencer le rapport de Bowen, qui démontre que les surfaces des zones urbaines dégagent beaucoup plus de chaleur sensible que les surfaces des zones rurales (Gachon *et al.*, 2016). Cela explique pourquoi les régions périurbaines, où il y a une forte concentration de végétation, ont des températures de surface et de l'air (pendant la journée et la nuit) plus faibles que les centres urbains où il y a peu de végétation (Martin *et al.*, 2015).

Un autre facteur qui influence la formation des ICU est le phénomène de canyon urbain. Celui-ci est défini comme étant : « L'absorption du rayonnement solaire à ondes courtes par des matériaux à faible albédo (réflexion) et le piégeage par des réflexions multiples entre les bâtiments et la surface des rues. » (Klepporner *et al.*, 2012). Ce phénomène peut être caractérisé par le ratio H:L (Hauteur/Largeur) des bâtiments. Ce ratio signifie qu'il est possible de localiser les endroits où on constate la présence du phénomène de canyon urbain par la hauteur des bâtiments et le largueur entre les bâtiments. Dans le contexte où nous retrouvons des bâtiments élevés et que l'espacement entre ceux-ci est faible, la chaleur y est parfois emprisonnée. Cela s'explique par le fait que les bâtiments empêchent la circulation de l'air et que les multiples surfaces minéralisées dans le canyon urbain dégagent de la chaleur sensible ayant pour effet de faire stagner la chaleur (Mohajerani *et al.*, 2017). Les

rayonnements solaires dans ce contexte sont réfléchis sur les multiples surfaces ce qui exacerbe la chaleur (Theeuwes *et al.*, 2014).

Il existe un autre indice qui permet d'identifier le phénomène de canyon urbain, soit le FCV (Facteur Ciel Vu). On le définit plus spécifiquement comme « Une mesure de la quantité de ciel visible à un endroit donné et qui peut être utilisée pour décrire facilement la forme tridimensionnelle de l'environnement bâti comme une métrique bidimensionnelle. » (Middel *et al.*, 2018). Il se quantifie de 0 à 1, 0 signifiant que le ciel est complètement bloqué par des objets et 1 signifie l'inverse, soit que le ciel est complètement dégagé (Middel *et al.*, 2018). Certaines études ont même démontré qu'il y a une forte corrélation entre la température nocturne et le Facteur Ciel Vu (Hamdi et Schayes, 2008). En effet, comme le montre la Figure 1.1, plus le FCV augmente, plus la température nocturne diminue (Hamdi et Schayes, 2008).

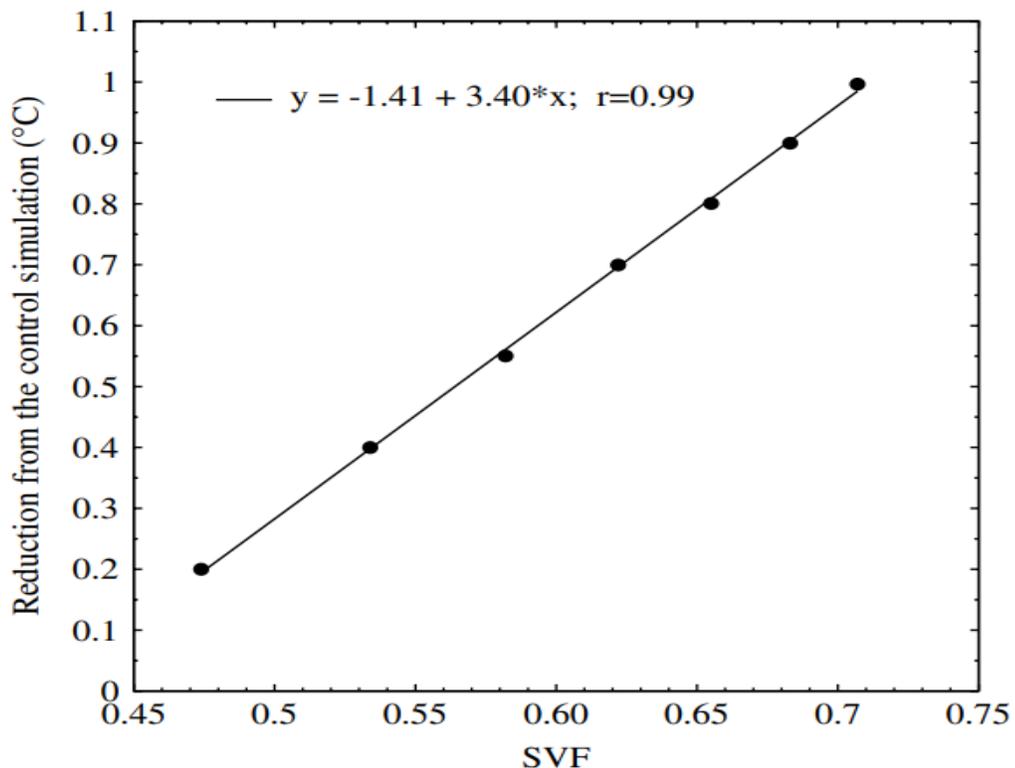


Figure 1.1 L'effet du FCV (SVF) sur la réduction des températures nocturnes (Hamdi, 2008, p.980)

Cet indice permet donc de localiser non seulement les endroits où il est plus probable que l'ICU se développe, mais quantifie également l'influence du cadre bâti sur l'ombrage qu'il procure au sol. Il existe un autre indice qui quantifie l'ombrage au sol : le *Shadow Fraction*. Celui-ci donne de l'information sur le pourcentage d'ombre et d'ensoleillement pendant une journée. Il correspond à des valeurs de 0 à 100%, avec un chiffre de 100% qui signifie qu'un endroit spécifique était à l'ombre pour la totalité de la période d'étude ou de la journée (Lindberg *et al.*, 2015).

1.1.3 Les effets des ICUs

Il est important de délimiter et quantifier les effets des ICUs dans les villes à l'aide des indices mentionnés ci-dessus, sachant que ceux-ci engendrent des effets délétères sur la santé des individus exposés aux fortes chaleurs. En effet, comme mentionné précédemment, les ICU ont des conséquences graves sur les populations vulnérables. L'une des catégories de personnes vulnérables les plus touchées correspond aux populations âgées de plus de 65 ans. Cette tranche d'âge qui est particulièrement affectée par les effets des ICU succombe en premier lors des périodes de canicule (CISSS, 2019). Effectivement, selon un rapport épidémiologique réalisé à la ville de Laval, parmi les 12 personnes décédées durant la période de chaleur extrême à l'été 2018, la totalité d'entre elles avait 65 ans et plus (CISSS, 2019). Cela est plutôt préoccupant considérant la tendance au vieillissement accéléré de la population à travers le monde (Dumont, 2016), notamment au Canada et au Québec. En effet, ce phénomène est particulièrement présent au Québec où le vieillissement de la population est considéré comme l'un des plus importants mondialement (ISQ, 2019). En 2018, 18,8% de la population québécoise était composée de personnes âgées de plus de 65 ans (ISQ, 2019). On prévoit que cette proportion sera de 25% en 2030 et plus de 27% en 2050 (ISQ, 2019).

Il faudra donc trouver des solutions afin de diminuer le risque de stress thermique associé aux personnes vulnérables, compte tenu d'une part du vieillissement de la population, et d'autre part, du réchauffement climatique qui s'accélère (IPCC, 2018), en particulier au Québec (Bush et Lemmen, 2019).

1.1.4 Quantifier l'influence des arbres grâce à la modélisation

Comme mentionné précédemment, les arbres représentent des outils d'aménagement efficace réduisant le stress thermique en période caniculaire. Plusieurs études se sont penchées sur l'impact des arbres sur la chaleur et utilisant des méthodologies distinctes. Certaines études vont utiliser des senseurs météorologiques pour mesurer l'effet d'ombrage à grande échelle des arbres (Shasha-Bar *et al.*, 2011). Généralement ces études ont pour objectif d'évaluer l'effet des propriétés physiques des arbres afin de comprendre quelle espèce permet une meilleure atténuation du stress thermique. D'autres études utilisent plutôt la modélisation afin de simuler l'influence des arbres dans des contextes précis (Aminipouri *et al.*, 2019; Srivanit et Hokao, 2013; Thom *et al.*, 2016; Wang et Akbari, 2016). Grâce à la modélisation, il est possible de non seulement quantifier l'influence des propriétés physiques (Wang et Akbari, 2016), mais également d'évaluer l'effet de la localisation de l'arbre en fonction du cadre bâti (Thom *et al.*, 2016). Ceci permet également de calculer plusieurs indices de stress thermique. Ceux-ci sont importants, car ils offrent une meilleure interprétation du stress exercé par les conditions locales sur le corps humain que la simple valeur de température. La température radiante médiane (T_{mrt}) est un exemple d'indice. Cet indice de stress thermique permet de calculer l'échange de flux radiatif entre le corps humain ou une surface et l'air selon les longues et courtes longueurs d'onde électromagnétique, et ce en degrés Celsius (Thorsson *et al.*, 2014). De multiples études ont démontré que ce facteur est crucial dans l'évaluation du

confort thermique durant la période estivale (Cohen *et al.*, 2012). Une étude indique également que la T_{mrt} est le meilleur prédicteur de mortalité lors de longues périodes caniculaires (Thorsson *et al.*, 2014). Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer ou de quantifier cet indice afin de mieux anticiper et réduire les effets de stress thermique des milieux urbains sur les populations.

Il existe une multitude de modèles prédisant la T_{mrt} , parmi les plus courants on peut nommer les trois modèles : *SOLWEIG* (Lindberg *et al.*, 2008), *RayMan Pro* (Matzarakis *et al.*, 2011) et *ENVI-met* (Huttner, 2012). Avant de procéder à l'élaboration de la méthodologie, il est nécessaire de documenter chacun de ces modèles afin de sélectionner le plus approprié pour la prévision de la T_{mrt} .

Premièrement, il y a le modèle *SOLWEIG*. Celui-ci est défini comme étant : « [...] a 2.5 dimensional model that simulates the spatio-temporal variation of short and longwave radiation fluxes in urban environment. » (Lindberg *et al.*, 2008). Ce modèle calcule la T_{mrt} en utilisant l'approche développée par Höppe (Höppe, 1992; Gál et Kántor, 2020). Cette méthode estime les radiations de courtes et longues longueurs d'onde dans six différentes directions, soit du haut en bas et vers les quatre points cardinaux. Cette méthode calcule la T_{mrt} à partir d'un rectangle représentant un humain debout, ce qui permet de quantifier laquelle des différentes surfaces du corps reçoit l'énergie radiative incidente (Lindberg et Grimmond, 2011). *SOLWEIG* prend également en considération, en plus des rayonnements incidents, la réflectance des rayons solaires sur les surfaces avoisinantes (Lindberg et Grimmond., 2011).

Le deuxième modèle est *RayMan Pro*. Ce modèle calcule la T_{mrt} en utilisant la méthode de Fanger (Gál et Kántor, 2020). Cette méthode est un dérivé de la somme des ondes radiatives de courtes et longues longueurs d'onde absorbées par l'humain plus l'énergie des rayonnements solaires incidents. Le

modèle divise les calculs dans l'environnement tridimensionnel en deux sections, soit en haut et en bas de la hauteur de 1.1 mètre (Matzarakis *et al.*, 2011). La partie en dessous de 1,1 mètre prend en considération l'albédo du sol, tandis que celle supérieure à 1,1 mètre calcule le FCV, soit la partie visible du ciel.

Le troisième modèle est *ENVI-met*. Il est défini comme étant un modèle microclimatique tridimensionnel de haute résolution qui a été élaboré afin de simuler l'interaction entre l'air, les plantes, et la surface (Ozkeresteci *et al.*, 2003). Le modèle est basé sur les équations de Reynolds, basées sur les principes de la mécanique des fluides (Carfan *et al.*, 2012). Similairement au modèle *RayMan Pro*, il calcule la T_{mrt} en divisant deux hémisphères en haut et en bas de 1,1 mètre et estime que 50% de la radiation viendra du haut et 50% du bas (Huttner, 2012).

Suite à l'analyse des trois modèles les plus utilisés pour l'étude des ICU en milieu urbain, il semblerait que le choix se porte sur *SOLWEIG*. Ce choix découle du fait que l'étude de Gál et Kántor (2020) conclut que parmi les trois modèles, *SOLWEIG* est le plus précis dans l'estimation de la T_{mrt} . De plus, contrairement aux autres modèles, celui-ci modélise de manière plus complète l'interaction entre les courtes longueurs d'ondes, les surfaces et la canopée d'arbres (Gál et Kántor, 2020). Comparativement aux autres modèles mentionnés précédemment, c'est *SOLWEIG* qui apporte la meilleure estimation des températures lors des période les plus chaudes de la journée, ce qui est une période cruciale à analyser lorsqu'il est question du stress thermique (Gál et Kántor, 2020). *ENVI-met* est cité également comme étant efficace à estimer la T_{mrt} (Ozkeresteci *et al.*, 2003). Par contre celui-ci a tendance à faire une surestimation de la T_{mrt} lorsqu'il y a présence d'ombrage d'arbre (Gál et Kántor, 2020). Cela s'explique par le fait que *ENVI-met* calcule

la T_{mrt} , soit en ne prenant pas en compte de l'atténuation des arbres sur les rayonnements diffus solaire (Gál et Kántor, 2020). Étant donné que cette étude se penche sur l'influence des arbres sur le stress thermique, il est important de prendre le modèle qui considère adéquatement leur influence, soit *SOLWEIG*. Il faut également prendre note qu'il fut sélectionné pour son interface simple d'utilisation et sa rapidité d'exécution.

1.2 Problématique

L'étude de l'aménagement des arbres est pertinente en raison du contexte actuel et futur du développement des villes. Comme il a déjà été établi, les villes seront habitées par une plus forte proportion de personnes vulnérables en raison du vieillissement de la population (ISQ, 2019). De plus, les températures estivales seront de plus en plus élevées en raison des changements climatiques, ce qui aura pour effet d'augmenter l'intensité et la longueur des épisodes caniculaires (Gachon *et al.*, 2016). Étant l'une des populations avec un taux de vieillissement les plus rapides mondialement, le Québec sera particulièrement touché par cette problématique (ISQ, 2019). Montréal est la ville ayant la plus grande population du Québec avec une 2 000 000 de personnes, soit environ 23% de la population totale du Québec (ISQ, 2020). Donc, étudier comment les arbres peuvent atténuer les effets des ICU à Montréal revêt un intérêt majeur pour la population Québécoise.

Cette recherche s'inscrit également dans un contexte environnemental et urbain particuliers voire uniques de l'île de Montréal. Plusieurs études ont déjà donné des lignes directrices sur comment aménager les arbres de manière efficace dans le contexte urbain. Par exemple, on veut prioriser la plantation d'arbres dans les rues avec un faible ratio de hauteur et de largeur. On justifie cela par le fait que ces rues sont affectées par une plus grande quantité de

rayonnement solaire incident étant donné leur géométrie évasée (Norton *et al.*, 2015). Dans ce contexte, les arbres fournissent de l'ombre sur une plus longue période durant la journée (Thom *et al.*, 2016). On veut également prioriser la plantation d'arbres dans les rues avec une direction est/ouest étant donné que ces rues comportent déjà un effet d'ombrage généré par les bâtiments en raison de l'orientation des rues (Ali-Toudert *et al.*, 2006). Certes, ces règles ont été prouvées comme étant efficaces aux endroits où ces études furent réalisées. Par contre, Montréal a la particularité d'être aménagée selon un plan à damier avec un angle particulier, ce qui fait en sorte que son réseau routier n'est pas aligné avec le vrai nord. Cet aspect particulier nous apparaît donc intéressant à étudier, afin de mesurer si certains critères d'aménagement des arbres doivent être adaptés au contexte montréalais. Il faut également prendre en considération que les rues de Montréal sont organisées selon un plan à damier ou orthogonal où les rues sont perpendiculaires et parallèles les unes aux autres. Ce type de plan de ville a une influence directe sur les zones d'ombrage selon l'angle d'incidence du rayonnement solaire qui affecte Montréal. Donc, en raison de cet agencement particulier, les résultats de cette recherche ne seront comparables qu'avec des villes du même type de planification territoriale.

Notre étude constitue la première évaluation utilisant le modèle *SOLWEIG* pour étudier les ICU sur l'île de Montréal. Certaines études ont déjà employé d'autres modèles pour étudier l'impact des arbres sur le stress thermique sur l'île de Montréal (Wang et Akbari, 2016), mais pas avec le modèle *SOLWEIG*. De plus, l'utilisation de *SOLWEIG* permet l'élaboration d'une méthodologie unique qui permettra de répondre aux objectifs de cette recherche présentés par la suite. En effet, grâce à la rapidité d'exécution du modèle, il sera possible de produire plusieurs scénarios de modélisation. Les modélisations présenteront différents scénarios de plantation d'arbres positionnés à

différents endroits. Ces divers scénarios seront analysés individuellement afin de connaître l'impact de différents positionnements d'arbres sur la T_{mrt} . Grâce à la modélisation, il sera possible de savoir à quel endroit dans le cadre urbain les arbres atténuent le mieux la présence des ICU. Cette recherche permettra en outre d'améliorer les connaissances sur l'interaction entre l'arbre et le contexte urbain dans lequel il se situe.

Cette recherche est également pertinente, car elle vient s'inscrire dans les différents projets de verdissement qui sont planifiés au Québec. En effet, dans le plan climat de 2020 à 2030 réalisé par la mairie de Montréal, il est prévu de planter environ 500 000 arbres sur le territoire montréalais dans la prochaine décennie (Ville de Montréal, 2020). Ce mémoire viendra donc contribuer à informer les planificateurs des meilleurs endroits où il faudrait planter ces arbres afin qu'il réduise le stress thermique sur le territoire montréalais.

1.3 Présentation des objectifs

Voici maintenant l'élaboration des différents objectifs de cette recherche.

1.3.1 Objectif principal

L'objectif principal de cette étude est de mieux comprendre comment aménager les arbres afin que ceux-ci atténuent la T_{mrt} de manière optimale dans les contextes urbains de Montréal. On cherche en d'autres mots à diminuer le stress thermique lors des canicules que les îlots de chaleurs exacerbent. Afin de quantifier le stress thermique, c'est la variable T_{mrt} qui est choisie comme variable explicative ou analysée. Plusieurs études utilisent ce facteur dans l'évaluation du confort thermique durant la période estivale (Cohen *et al.*, 2012 ; Aminipouri *et al.*, 2019 ; Yang et Lin, 2016). Ainsi la T_{mrt}

représente l'indice de stress thermique qui semble le plus pertinent d'utiliser dans le cadre de notre recherche.

Le but général de cette étude consiste à savoir si dans certains cas une moins grande superficie de canopée diminue plus largement la T_{mrt} . Cet objectif principal est lié au concept d'aménagement optimal qui se base sur la superficie totale de canopée en m^2 . Afin de connaître les endroits optimaux d'aménagement d'arbres, il faudra diviser la T_{mrt} atténuée des scénarios d'aménagement par la superficie de canopée en m^2 . Cela nous donnera au final l'atténuation de T_{mrt} par m^2 de canopée. Dans un monde idéal, afin de diminuer les effets des îlots de chaleur, il faudrait planter le plus d'arbres possible dans les centres urbains. Bien évidemment en pratique cela est difficilement réalisable. Le territoire urbain comporte énormément de règles qui doivent accommoder de nombreux acteurs. Dans ce contexte densément occupé, les arbres occupent une place limitée. C'est pourquoi les résultats de notre recherche permettront potentiellement de prioriser les endroits où les arbres atténuent plus amplement la T_{mrt} . Découlant de cet objectif principal viennent trois objectifs secondaires.

1.3.2 Objectif secondaire 1

Le premier objectif secondaire consiste à caractériser le tissu urbain des zones d'études afin de mieux comprendre l'interaction complexe entre les arbres et le tissu urbain. Il est primordial de choisir deux zones d'étude distinctes afin de pouvoir observer précisément l'influence de la morphologie urbaine sur l'efficacité d'atténuation de la température par la plantation d'arbres. En ayant une distinction morphologique entre les deux zones, il sera possible d'induire certaines règles universelles applicables dans différents contextes urbains. Les résultats entre les secteurs permettront de démontrer l'influence du tissu

urbain sur l'atténuation de la chaleur produite par les arbres. L'ensemble des éléments physiques du cadre urbain défini par la structuration architecturale, le réseau de voirie, les espaces verts, etc, (Schmerber, 2010), seront analysés à partir des informations disponibles sur le cadre bâti et l'occupation du sol.

1.3.3 Objectif secondaire 2

Le deuxième objectif secondaire est de modéliser l'impact de la répartition des arbres sur la T_{mrt} . Le concept clé de cet objectif repose sur la modélisation. Le processus de modélisation est l'action d'utiliser un modèle qui peut être défini comme : « *A representation of some phenomenon of the real world made in order to facilitate and understanding of its workings.* » (Mayhew, 2009, p.328). Afin de mieux comprendre l'interaction entre les arbres et la chaleur, il faut donc utiliser le modèle qui reproduit la réalité avec la plus grande exactitude. C'est pourquoi il fut nécessaire de prédéterminer le modèle le plus adéquat à cette recherche. Comme mentionné dans la section précédente, ce fut le modèle **SOLWEIG** (Solar LongWave Environmental Irradiance Geometry) qui fut sélectionné pour sa précision d'estimation de la T_{mrt} .

Deux types de variables sont nécessaires à la modélisation : l'information ou les données spatiales et les données météorologiques. Ces deux séries d'information représentent l'intégralité des données exigées pour l'exécution du modèle **SOLWEIG**.

1.3.4 Objectif secondaire 3

Le dernier objectif secondaire est de quantifier l'influence du positionnement et la quantité de la canopée sur la T_{mrt} , en utilisant différents scénarios d'aménagement d'arbres. Cet objectif déterminera s'il y a bel et bien des

endroits spécifiques dans le cadre urbain où les arbres peuvent atténuer la chaleur de manière plus efficace qu'ailleurs au sein du tissu urbain. Deux variables font partie de cet objectif, soit la répartition et la quantité de la canopée.

Dans le chapitre suivant, les étapes méthodologiques de la recherche sont présentées, notamment les approches utilisées pour la modélisation ainsi que pour l'analyse des résultats.

CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente l'ensemble des étapes méthodologiques permettant de répondre aux objectifs visés dans notre étude. La première section décrit les zones d'étude ainsi que les caractéristiques de leur tissu urbain. La deuxième section porte sur les données utilisées afin de répondre aux différents objectifs de recherche. La troisième section détaillera les différentes transformations des données géospatiales nécessaires afin d'entamer l'étape de modélisation. La quatrième section, le fonctionnement du modèle *SOLWEIG* sera présenté ainsi que l'élaboration des différents scénarios d'aménagement d'arbres fictifs. Finalement, la méthodologie sur l'analyse des résultats est précisée.

2.1 Zones d'étude

Les deux zones d'étude de cette recherche se trouvent sur l'île de Montréal, dans le centre-ville. Malgré leur proximité, elles sont situées dans deux quartiers forts différents, soit le Plateau Mont-Royal et l'agglomération Ville-Marie (Figure 2.1). Tandis que Ville-Marie est situé dans le quartier des affaires, le Plateau Mont-Royal est situé sur le versant est du Mont-Royal sur un plateau surplombant le centre-ville de Montréal délimité par la rue Sherbrooke. Celles-ci furent sélectionnées en raison de leurs multiples distinctions.

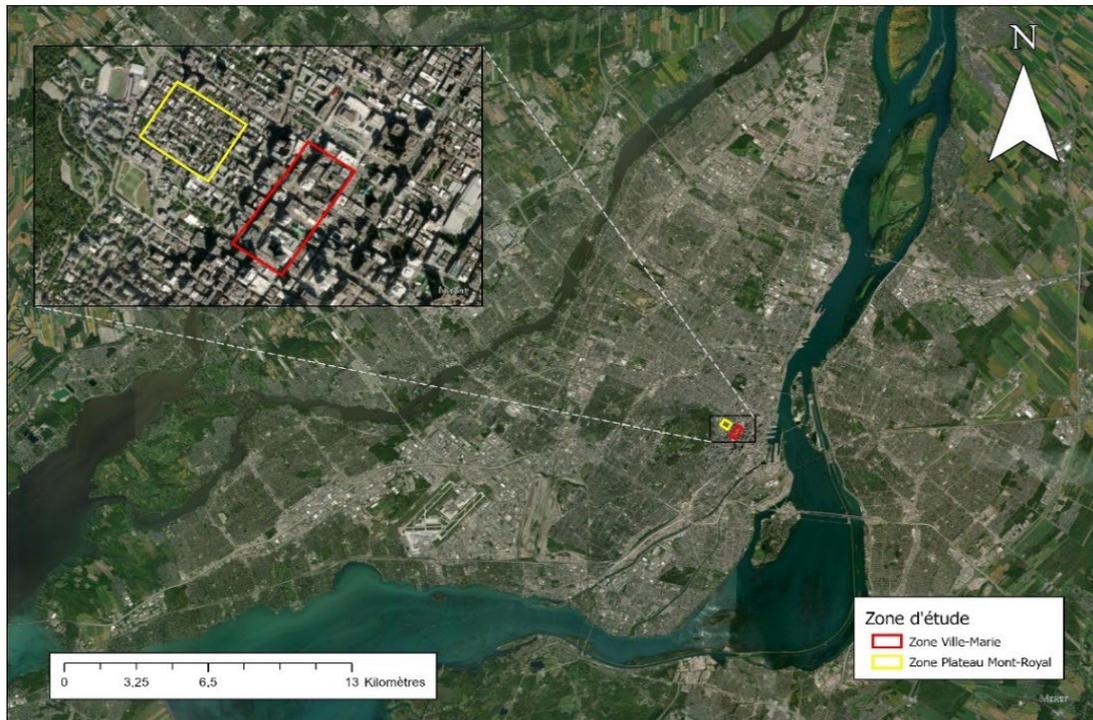


Figure 2.1 Les deux zones d'études dans le contexte montréalais

La première zone, située dans le quartier Ville-Marie, est composée de nombreux gratte-ciels et d'édifices ayant une haute élévation (Figures 2.2 et 2.3). La deuxième zone d'étude est localisée sur le Plateau Mont-Royal (Figures 2.4 & 2.5). Plus spécifiquement dans un secteur de ce quartier, appelée Milton Parc, ou plus communément, le « Ghetto de McGill », en raison du grand nombre d'habitations où résident des étudiants de l'Université McGill. La morphologie urbaine de cette zone est composée de bâtiments de deux à trois étages. Les deux zones se distinguent également par leur démographie. En effet, la zone du Plateau Mont-Royal est peuplée d'environ 6 000 habitants et tandis que la zone de Ville-Marie est habitée par environ 2 500 personnes (Statistique Canada, 2016). Également, il faut noter que les deux zones ont une superficie totale différente. Allant de 162 375 m² pour Ville-Marie et à 122 604 m² pour le Plateau Mont-Royal.

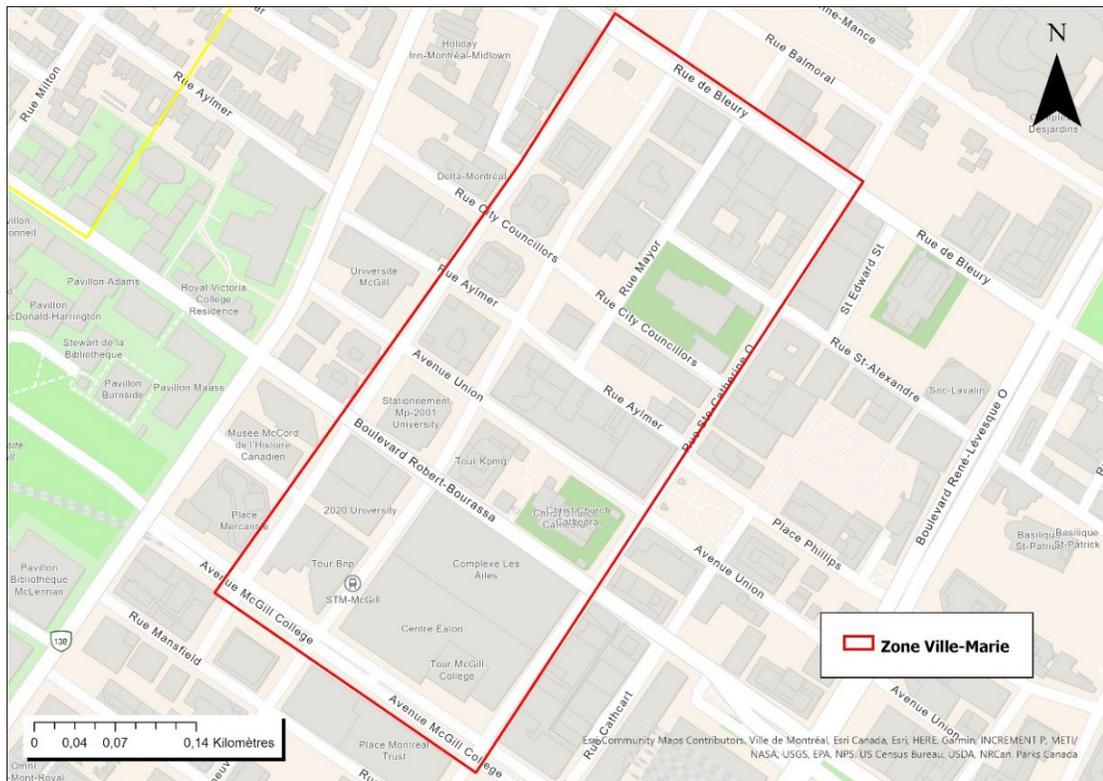


Figure 2.2 Délimitation de la zone d'étude de Ville-Marie

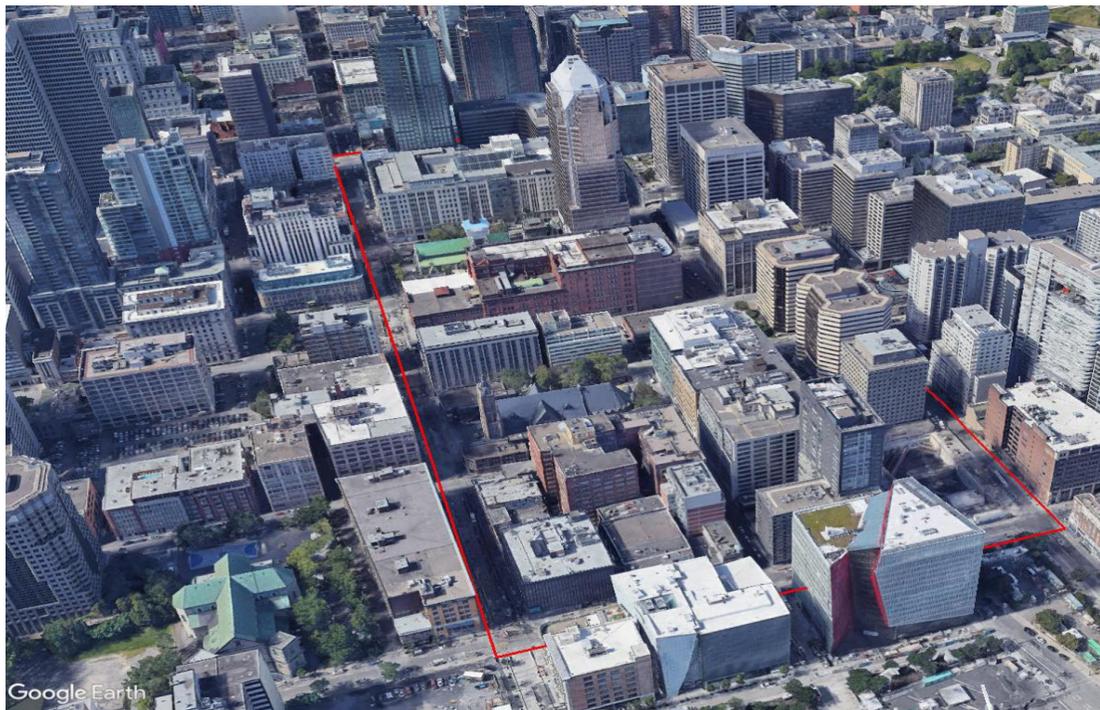


Figure 2.3 Cadre bâti de la zone d'étude de Ville-Marie



Figure 2.4 Délimitation de la zone d'étude du Plateau Mont-Royal

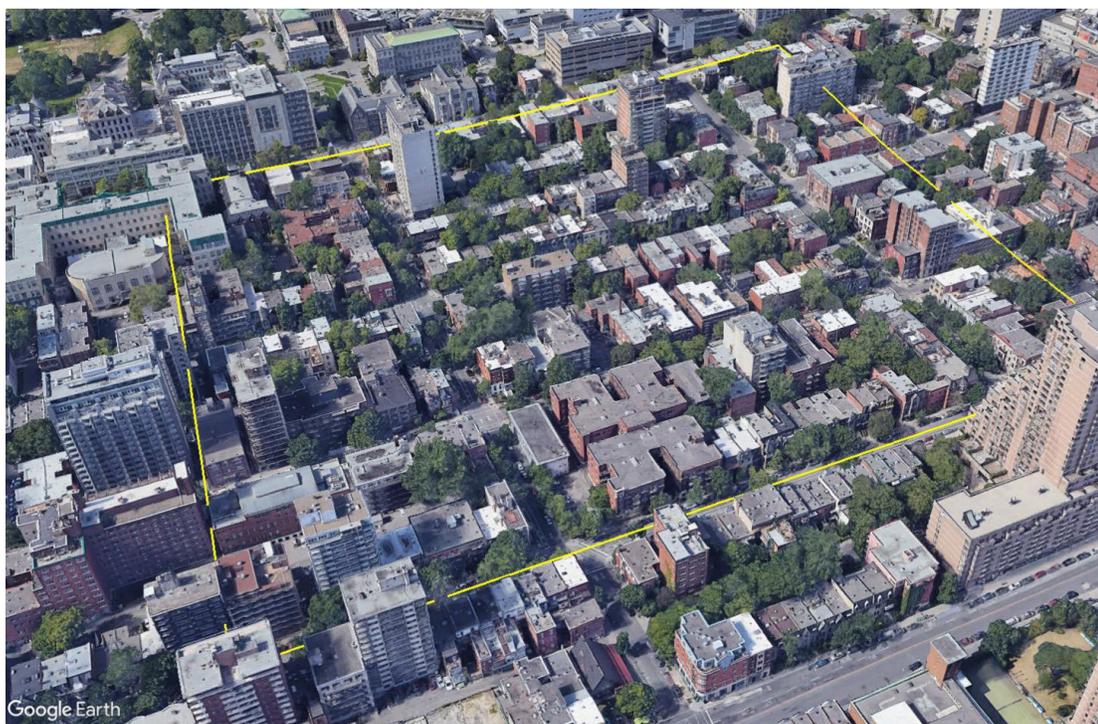


Figure 2.5 Cadre bâti de la zone d'étude du Plateau Mont-Royal

Afin de répondre au premier objectif de cette étude, il est nécessaire de caractériser le tissu urbain des deux zones d'étude de manière approfondie. C'est pourquoi une caractérisation des zones sera réalisée dans le chapitre des résultats et non dans cette section. Voici comment cette description du tissu urbain a été réalisée.

Premièrement, il faut quantifier le cadre de bâti des zones d'étude. D'abord, il est nécessaire de trouver la hauteur des bâtiments. L'information sur l'élévation des zones d'étude a été calculée à partir d'une couche vectorielle de points d'élévation des bâtiments provenant des données disponibles sur le site de la communauté métropolitaine de Montréal (Données Ouvertes, 2016). Avec cette information, il fut possible de calculer l'élévation moyenne des bâtiments ainsi que l'élévation maximale et minimale des bâtiments. Les résultats préliminaires nous démontrent une distinction entre les deux zones, ces chiffres seront abordés à la section résultats.

Ces différences de hauteur de bâtiment et de largeur de rue s'observent également avec le Facteur Ciel Vu. Les valeurs des deux zones ont été calculées à partir de l'outil de la suite UMEP nommé *Sky View Factor*. Le *Shadow Fraction* a également été calculé à partir d'un outil de la suite UMEP, soit *Daily Shadow Pattern*. Ces outils sont en mesure d'extrapoler les scores sur l'ensemble des zones d'étude grâce à l'information matricielle du MNS.

L'angle des rues a été calculé grâce à de l'information vectorielle disponible sur le portail de données ouvertes de la ville de Montréal. La fonction d'*ArcGis Pro : Linear Direction Mean* a par la suite déterminé l'angle moyen des rues des quartiers.

Deuxièmement, il est nécessaire de quantifier l'occupation du sol des zones d'étude. Pour ce faire il est d'abord nécessaire de quantifier l'occupation du sol des zones d'étude, pour ensuite les classer dans le logiciel *SOLWEIG*.

L'occupation du sol des deux zones d'étude fut réalisée à partir de données géoréférencées fournies par la Ville de Montréal. Elle combine les données sur les actifs de voirie, ainsi que sur l'utilisation du sol. À partir de ces données, il fut possible de calculer la superficie d'occupation du cadre bâti, des trottoirs, de la canopée actuelle et des axes routiers et intersections. Cette description préliminaire de l'occupation du sol est nécessaire afin de voir les distinctions des quartiers. Ensuite il est essentiel de convertir cette occupation du sol pour le modèle *SOLWEIG*. Cela est important, car il faut que *SOLWEIG* puisse attribuer l'albédo approprié à chaque type d'occupation du sol. Le modèle permet de classer différents types de surfaces soit : pavée, bâtiment, herbe, terre et eau. Avec l'outil *Reclassify* de la suite d'outil *UMEP*, les types d'occupation du sol ont été reclassifiés pour que *SOLWEIG* puisse utiliser l'information dans la modélisation.

2.2 Présentation des données utilisées

Le tableau détaille l'ensemble données utilisés (Tableau 2.1), suivis d'un tableau des métadonnées (Tableau 2.2). Par la suite l'ensemble des variables et indicateurs répondant aux différents objectifs de cette recherche seront élaborés.

Tableau 2.1 Ensemble des outils et fonctions utilisés pour la modélisation

Nom de la fonction	Logiciel	Librairie	Rôle dans la méthodologie
Topo to Raster	Arcgis Pro	Spatial Analyst Tools	Générer le MNT des zones d'étude
Resample	Arcgis Pro	Data Management Tools	Ajustement de la taille des pixels du MNT
Clip Raster	Arcgis Pro	Data Management Tools	Ajustement des MNS et MNT aux zones d'étude
Project	Arcgis Pro	Data Management Tools	Reprojection des couches MNT et MNS pour qu'elles soient en UTM
Wall Aspect / Wall Height	QGIS	UMEP	Générer la couche Wall Aspect et Wall Height
Sky View Factor	QGIS	UMEP	Générer les couches de score Sky View Factor pour l'ensemble des scénarios
Training Samples	Arcgis Pro	Classification Tools	Définition des échantillons pour la classification des imageries aériennes
Classify	Arcgis Pro	Classification Tools	Classification de l'imagerie aérienne
Land Cover Reclassifier	QGIS	UMEP	Formatage de la classification pour SOLWEIG
Prepare Existing Data	QGIS	UMEP	Formatage de l'information météorologique pour SOLWEIG
Linear Direction Mean	Arcgis Pro	Spatial Analyst Tools	Déterminer l'angle moyen des rues de la ville de Montréal
Generate Points Along Lines	Arcgis Pro	Data Management Tools	Déterminer l'emplacement des arbres le long des trottoirs
Tree Generator	QGIS	UMEP	Générer la couche de CDSM et TDSM pour l'ensemble des scénarios
SOLWEIG	QGIS	UMEP	Générer les cartes de T_{mrt} pour l'ensemble des scénarios
SOLWEIG Analyser	QGIS	UMEP	Effacer les valeurs des pixels aux endroits où il y a présence de bâtiments et générer de l'information sur les POIs.
Information Raster	QGIS	Raster / Divers	Calculer la moyenne de la valeur des pixels des cartes de T_{mrt} ajustée par SOLWEIG Analyser
Extract values to point	Arcgis Pro	Spatial Analyst Tools	Déterminer la T_{mrt} et le SVF à la localisation précise de chacun des POIs
Daily Shadow Pattern	QGIS	UMEP	Calculer le <i>Shadow Fraction</i> des deux zones d'études.

Tableau 2.2 Ensemble des données utilisés pour la modélisation

Type de données, zone.	Format	Date-source	Projection	Échelle ou résolution
Couche hypsométrique (MNT), 31hl102, 31hl202 .	Shapefile	2000, Base de données topographiques du Québec (BDTQ)	NAD83 MTM 8	Échelle de 1/20 000
Modèle numérique de surface (MNS), Ville-Marie.	GeoTIFF	2015, Portail de données du Québec	NAD83 SCRS (97) – EPSG 2950	Modèle basé sur du LiDAR aéroporté
Modèle numérique de surface (MNS), Plateau Mont-Royal.	GeoTIFF	2015, Portail de données du Québec	NAD83 SCRS (97) – jerEPSG 2950	Modèle basé sur du LiDAR aéroporté
Actifs de voiries, Montréal	Shapefile	2018, Portail de données de la Ville de Montréal	NAD 1983 MTM 8	
Utilisation du sol, Montréal	Shapefile	2020, Données géoréférencées de la Communauté métropolitaine de Montréal	NAD 1983 MTM 8	
Données démographiques, Québec, Montréal	Beyond 20/20 Professional Browser (.IVT)	2016, Statistique Canada		
Données météorologiques, Montréal, ESCER	CSV	2 Juillet 2018, Site de l'ESCER		Données enregistrées dans le fuseau horaire UTC +0

2.2.1 Variables et indicateurs de la caractérisation des zones d'études

Le premier objectif secondaire rappelons-le est de caractériser le tissu des zones d'étude. Pour ce faire les variables du cadre bâti et d'occupation du sol sont utilisées.

2.2.1.1 Cadre bâti

Le cadre bâti signifie l'ensemble des bâtiments et autres structures urbaines qui y sont reliées (Québec, 2020). On parle plus spécifiquement de l'empreinte des bâtiments et des différentes constructions. Pour ce faire, quatre indicateurs qui décrivent les caractéristiques physiques des bâtiments ainsi que leur influence sur les zones d'étude sont utilisés.

Le premier sera la hauteur des bâtiments. Cet indicateur est particulièrement important, car la hauteur d'un bâtiment influence l'ombre que celui-ci porte au sol.

Le deuxième indicateur est l'angle moyen des axes routiers. Cet indicateur est important, car il a une forte incidence sur la façon dont les rayonnements solaires incidents frappent les surfaces des zones d'étude durant la journée. L'angle des rues est variable selon les secteurs de Montréal, donc connaître ce chiffre sert à pouvoir appliquer les résultats obtenus dans d'autres quartiers avec des angles de rues similaires.

Le troisième indicateur est le Facteur Ciel Vu (FCV). Comme mentionné dans la section de revue de littérature, le FCV est un indice qui signifie la portion du ciel visible à un endroit fixe (Middel *et al.*, 2018). Il est particulièrement

important, car il permet de localiser les endroits où il y a présence du phénomène de canyon urbain.

Le quatrième et dernier indicateur se nomme le *Shadow Fraction*. Comme mentionné précédemment, cet indice indique le pourcentage d'ombrage sur une période de temps (Lindberg *et al.*, 2008). Donc, quantifier cet indicateur est pertinent, car cela rend possible de comprendre l'influence de l'incidence solaire sur l'efficacité d'atténuation de chaleur des arbres.

2.2.1.2 L'occupation du sol

L'occupation du sol nous servira à connaître l'emplacement des différents matériaux au travers des zones d'étude. Cela est important, car les matériaux ont un albédo distinct, c'est-à-dire que ceux-ci reflètent diverses proportions du rayonnement solaire. Il servira notamment à distinguer l'empreinte des bâtiments et les endroits au sol. De cette variable viennent trois indicateurs.

Le premier indicateur est la superficie des types d'occupation du sol. À partir de cette information, nous pourrons comparer les différences de composition des matériaux utilisés entre nos deux zones d'études.

Le deuxième indicateur est l'empreinte du type d'occupation du sol (X, Y). Cela signifie la localisation et les délimitations des différents types d'occupation du sol. Cela est utile pour l'étape de modélisation où le modèle devra utiliser cette information pour interpréter l'albédo au travers des zones d'étude. L'empreinte des bâtiments sera particulièrement importante dans l'étape de modélisation.

Le troisième et dernier indicateur est le type d'occupation du sol. En sachant le type d'occupation du sol, l'albédo approprié peut-être par la suite être attribué à chaque parcelle occupant les zones d'étude.

Tableau 2.3 Résumé de l'objectif secondaire 1

Objectif secondaire 1	Concept/processus clé	Variable	Indicateur
Caractériser la forme urbaine des zones d'études.	Tissu urbain	1A Cadre bâti	1Aa Hauteur des bâtiments (m)
			1Ab L'angle moyen des axes routiers
			1Ac Score FCV
			1Ad <i>Shadow Fraction</i>
		1B Occupation du sol	1Ba Superficie du type d'occupation du sol (m ²)
			1Bb Emplacement du type d'occupation du sol (X, Y)
			1Bc Type d'occupation du sol

2.2.2 Variables et indicateurs spatiaux (topographie, surface et canopée)

2.2.2.1 Informations spatiales ou dérivées de modèles numériques (surface)

L'information spatiale réfère à de l'information géoréférencée qui permet au modèle d'interpréter les zones d'étude dans un espace tridimensionnel. On distingue trois indicateurs qui représentent l'information spatiale nécessaire pour l'exécution du modèle : le modèle numérique de surface (MNS), le modèle numérique de terrain (MNT) et le modèle numérique de canopée (MNC).

Le MNS est l'acronyme de modèle numérique de surface. Il réfère à des données de type matriciel. Celles-ci fournissent, avec la valeur des pixels, de l'information sur l'altimétrie d'un territoire, en y incluant les éléments du cadre bâti (Données Québec, 2020). Ce type d'information spatiale permet de déterminer entre autres l'occupation volumétrique des bâtiments dans les zones d'étude. La source d'information des MNS utilisée dans le cadre de cette recherche provient du site du portail de données ouvertes du gouvernement du Québec (Données Québec, 2015). Par contre, cette information a dû être modifiée afin de l'utiliser dans le modèle SOLWEIG.

Le MNT renvoie également à des données matricielles, mais celles-ci ne fournissent de l'information que sur l'altimétrie et sur l'élévation du sol et non sur les éléments du cadre bâti (Données Québec, 2020). Les données du MNT découlent de l'information des courbes de niveau disponibles sur le site du MERN (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles) (MERN, 2020). Les feuillets cartographiques utilisés sont : 31he202, 31hi102 et 31hi202 (MERN, 2020). Il faut noter que la résolution des feuillets est de 1:20 000. À partir des courbes de niveau, il est possible de générer un MNT à l'aide de la fonction de *ArcGis Topo to Raster*. De plus, afin d'utiliser les données MNT dans le modèle SOLWEIG, une autre opération a dû être effectuée pour ce type de données.

Le MNC est l'acronyme de modèle numérique de canopée et représente l'altimétrie de la canopée urbaine (Portail de données ouvertes, 2018). Les données du MNC proviennent d'un outil dans la boîte à outils UMEP. Étant donné que la canopée employée dans la modélisation est fictive, celle-ci doit être générée artificiellement et non à partir des données réelles de la canopée

de Montréal. La méthodologie détaillée de l'élaboration des scénarios d'arbres et du MNC sera développée dans la section 2.7.

2.2.2.2 Données météorologiques

Les données météorologiques sont nécessaires à l'exécution du modèle, notamment afin de définir les conditions météorologiques propres à chaque zone d'étude. Les variables utilisées sont :

- Le rayonnement solaire incident de courte longueur d'onde (W/m^2),
- La vitesse du vent (m/s),
- La température de l'air ($^{\circ}C$),
- Humidité relative (%),
- La pression barométrique (kPa)
- Les précipitations (mm)

Donc avec l'ensemble de l'information spatiale et les données météorologiques, le modèle SOLWEIG est en mesure, croyons-nous, de modéliser les zones d'étude.

Les données météorologiques ont été prélevées à la station ESCER de l'UQAM, et l'ensemble des données se trouvent sur le site Internet d'ES CER (ES CER, 2020). Cette station est équipée de plusieurs instruments météorologiques permettant de mesurer les variables suivantes. L'humidité et la température sont enregistrées par un appareil transmetteur Vaisala HMD60Y de type Pt1000 RTD et celui-ci est couvert par un abri Vaisala de la série DTR500 afin de protéger le transmetteur de la pluie et les rayonnements solaires incidents (ES CER, 2020). La pluie est quantifiée par un pluviomètre Geonor T-200B (ES CER, 2020). Les rayonnements solaires incidents sont

mémorisés par un appareil de Campbell Scientific : le CNR1. Cet appareil est composé de quatre pyranomètres, deux qui notent les rayonnements solaires incidents et reflétés, ainsi que deux pyranomètres qui archivent les rayonnements infrarouges incidents et reflétés (ESCER, 2020). L'anémomètre ultrasonique WS425 enregistre la direction ainsi que la vitesse des vents (ESCER, 2020).

Les instruments de la station météorologique mesurent l'ensemble des données météorologiques chaque minute. Par contre, étant donné que cette fréquence de mesure augmente drastiquement le temps du traitement des résultats et que cette fréquence n'est pas nécessaire, on utilise plutôt que l'information à un intervalle de 30 minutes. On parle ici des données qui sont captées à chaque 30 minutes entre 5h30 et 20h30, soit 5h30, 6h, 6h30, 7h, etc. Il faut également prendre note que les données météorologiques utilisés ici sont celles du 2 Juillet 2018.

Tableau 2.4 Résumé de l'objectif secondaire 2

Objectif secondaire 2	Concept/processus clé	Variable	Indicateur
Modéliser l'impact de la répartition des arbres sur la température moyenne radiante (T_{mrt}).	Modélisation	2A Information spatiale	2Aa Modèle numérique de surface (MNS)
			2Ab Modèle numérique de terrain (MNT)
			2Ac Modèle numérique de canopée (MNC)
		2B Données météorologiques	2Ba Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)
			2Bb La vitesse du vent (m/s)
			2Bc Humidité relative (%)
			2Bd Précipitations (mm)
			2Be Rayonnement solaire incident (W/m^2)
			2Bf Pression barométrique (kPa)

2.2.3 Variables et indicateurs de la répartition et quantité de canopée

Le troisième objectif secondaire est de quantifier l'influence du positionnement de la quantité des arbres. De cela découlent les deux variables soit la répartition de la canopée et la quantité de canopées.

2.2.3.1 Répartition de la canopée

La répartition signifie non seulement les coordonnées géographiques de chacun des arbres, mais également la position de l'arbre en fonction d'autres

éléments descriptifs du tissu urbain. Le positionnement se quantifie par trois indicateurs.

Le premier indicateur est le côté de tronçon de rue. Dans un contexte urbain, les arbres, lorsque ceux-ci ne se situent pas dans un parc, sont très souvent aménagés en fonction des axes routiers. C'est pourquoi la variabilité de l'ensemble des scénarios d'aménagement va se réaliser en fonction de ceux-ci. Par exemple, un des scénarios de modélisation ne comportera que des arbres sur le côté nord des axes routiers. Au total, il y aura un ensemble de 15 scénarios différents pour les deux zones d'études soit :

- Nord
- Nord/Sud
- Nord/Est
- Nord/Ouest
- Nord/Sud/Ouest
- Nord/Est/Ouest
- Nord/Sud/Est
- Sud
- Sud/Est
- Sud/Ouest
- Sud/Est/Ouest
- Est
- Est/Ouest
- Ouest
- Nord/Sud/Est/Ouest.

Le deuxième indicateur réfère à un concept similaire au premier, soit la direction de l'axe routier. On parle donc ici d'un axe routier qui a soit une direction Nord/Sud, soit une direction Est/Ouest.

Le troisième indicateur concerne le FCV. Ce score comme mentionné précédemment identifie les endroits où il y a présence du phénomène de canyon urbain. Il faut mentionner ici que la mesure du FCV ici est différente de celle qui répond à l'objectif principal 1. En effet, pour l'objectif de la caractérisation du tissu urbain on quantifie le FCV au travers de la zone d'étude. Pour cet objectif, afin de mieux comprendre l'influence du positionnement de l'arbre sur la chaleur, il faut mesurer le FCV à l'endroit exact de chacun des arbres. En connaissant le FCV à chaque position d'arbre, nous obtenons de l'information sur la géométrie du cadre bâti à proximité de ceux-ci. Donc, cela précise comment le cadre bâti adjacent influence les capacités d'atténuation de chaleur des arbres.

2.2.3.2 Quantité de canopées

La deuxième variable est la quantité de canopées. La canopée est définie comme étant : « Zone d'une forêt qui correspond à la cime des grands arbres. » (Le Petit Robert, p.343). On parle donc ici de l'étage supérieur des arbres qui intercepte les rayonnements solaires incidents. Donc, par la quantification de la canopée, on veut dire en quelque sorte la quantité de feuillage. Cette quantité est mesurable par deux indicateurs : la superficie totale de canopée (m^2) et les caractéristiques physiques des arbres.

Le premier est la superficie de canopée totale en m^2 . Chaque scénario d'aménagement est différent, il est donc nécessaire de compiler les différentes superficies totales de canopée. La superficie de canopée est calculée à partir du diamètre maximal de la canopée.

Le deuxième indicateur comporte les caractéristiques physiques des arbres. Celui-ci regroupe plusieurs sous-indicateurs qui décrivent les dimensions de

l'arbre soit : la hauteur maximale de la canopée, le diamètre de la canopée et la hauteur du bas de la canopée. Par la hauteur du bas de la canopée, on signifie la hauteur de l'ensemble du tronc d'arbre de la base jusqu'au commencement du feuillage. La justification du choix de l'ensemble de ces dimensions sera développée au courant de la section sur la méthodologie de recherche.

Tableau 2.5 Résumé méthodologique de l'objectif secondaire 3

Objectif secondaire 3	Variable	Indicateur	Sous-indicateur
Quantifier l'influence du positionnement et la quantité de la canopée sur la T_{mrt}	3A Répartition de la canopée	3Aa Orientation du tronçon de rue (nord/sud, est/ouest)	
		3Ab Côté du tronçon de rue (nord, sud, est, ouest)	
		3Ac Le Score FCV	
	3B Quantité de canopées	3Ba Superficie de la canopée (m ²)	
		3Bb Caractéristiques physiques des arbres	3Bba Hauteur maximale de canopée (m)
			3Bbb Diamètre de canopée (m)
			3Bbc Hauteur du bas de la canopée (m)

2.3 Traitement des données géospatiales

Le modèle *SOLWEIG* nécessite que les couches MNS, de MNT et MNC soient de la même résolution. Donc, avec l'outil nommé *Resample* dans ArcGis, il fut possible de changer la résolution des données MNT pour qu'elle corresponde à celle des MNS. Il s'agit, dans ce cas précis, d'une valeur de pixels de 1,1

pixel. Cela équivaut à un mètre par pixel. Par la suite, l'ensemble des couches sont transformées de la projection *NAD83 / MTM zone 8* vers une projection *WGS84/UTM zone 18N*. Il faut noter que l'information sur le MNC sera détaillée dans la section sur l'élaboration des scénarios d'aménagement d'arbres qui seront générés à l'aide du modèle *SOLWEIG*.

Avant d'exécuter le modèle, il est nécessaire également d'utiliser des fonctions de la suite d'outils *UMEP* pour qu'elle puisse interpréter les caractéristiques tridimensionnelles des zones d'étude.

Premièrement, nous devons recourir à la fonction *Sky View Factor*. Celle-ci a pour intrant les MNS des zones d'étude et pour extrant une carte matricielle qui donne la valeur du Facteur Ciel Vu (FCV) en fonction de la zone étudiée. Le FCV devra être calculé pour l'ensemble des scénarios d'aménagement d'arbres, soit un total de 32 fois, incluant les deux scénarios sans arbre. Cela est nécessaire, car la présence d'arbres affecte la portion de ciel visible au sol.

Deuxièmement, on doit employer la fonction *Daily Shadow Pattern*. Celle-ci a également pour intrant les MNS des zones d'études et génère une carte matricielle nous donnant le *Shadow Fraction* des zones. Cette opération est exécutée seulement pour les scénarios d'aménagement sans arbre. Il est également possible de connaître le *Shadow Fraction* pour des intervalles d'heures. Donc, en plus des résultats pour l'ensemble de la journée (5h30-20h30), celle-ci sera réalisée également pour les heures d'avant-midi (5h30-12h) et d'après-midi (12h-20h30). Avoir un portrait des rayonnements solaires à différents moments dans la journée nous aide à établir des liens avec l'atténuation de la T_{mrt} générée par les aménagements d'arbres.

Troisièmement, nous devons employer l'outil *Wall Height and Aspect* disponible dans la boîte d'outils d'*UMEP*. Cette fonction définit les limites et les hauteurs des murs des bâtiments et objets tridimensionnels de la zone d'étude. Cette opération devra seulement être exécutée une fois par zone d'étude étant donné que la morphologie urbaine ne change pas en fonction des aménagements d'arbre.

Pour conclure, il faut garder en tête que la modélisation sera exécutée à multiples reprises. C'est-à-dire que pour chaque scénario d'aménagement d'arbre il faut générer une couche de MNC, de TDSM et de Facteur Ciel Vu. Donc au total, chaque zone aura 16 modélisations réalisées (15 avec présence d'arbres et une sans présence d'arbres) pour un total de 32 pour les deux zones (Figure 2.6). Voici un résumé de l'information nécessaire à l'exécution du modèle :

- 32 couches de MNC (une par scénario)
- 32 couches de TDSM (une par scénario)
- 32 couches matricielles du *Sky View Factor* (une par scénario)
- 2 couches MNS (une par zone)
- 2 couches MNT (une par zone)
- 2 couches matricielles sur le *Wall Height* (une par zone)
- 2 couches *Wall Aspect* (une par zone)
- 2 couches de l'occupation du sol (une par zone)
- 1 fichier des données météorologiques formaté

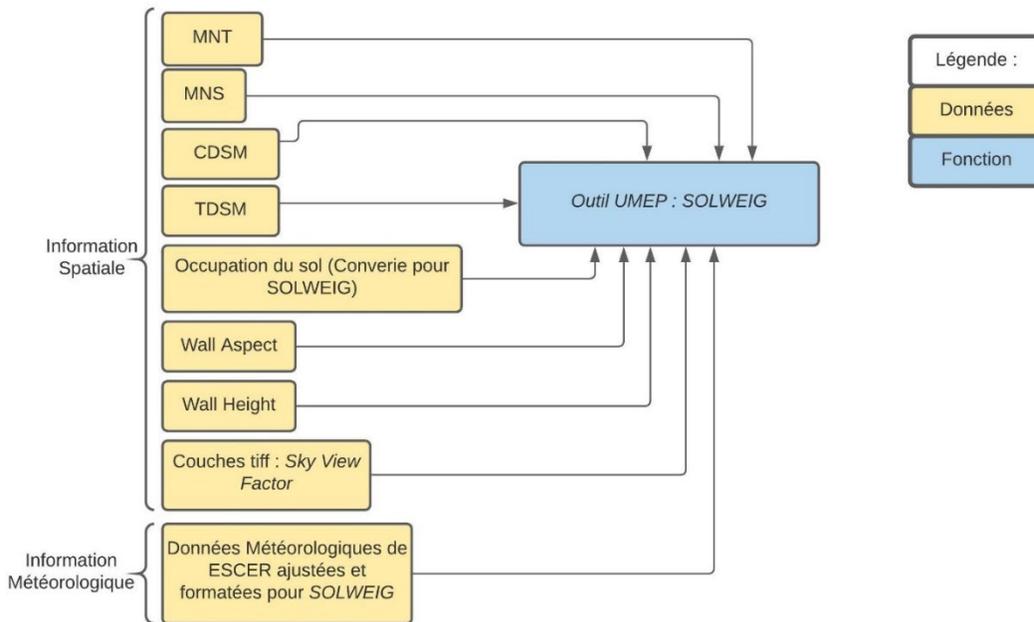


Figure 2.6 Organigramme de l'ensemble des données nécessaires à l'exécution du modèle SOLWEIG

2.4 Modélisation et élaboration des scénarios d'aménagement

2.4.1 Fonctionnement du modèle estimant le confort thermique

Dans notre cas, le modèle de bilan radiatif, incluant le calcul de T_{mrt} , choisi fut le modèle *SOLWEIG* (Lindberg *et al.*, 2008). Ce modèle développé en Allemagne, fait partie de la boîte à outils *UMEP* (*Urban Multi-scale Environmental Predictor*) disponible à partir du logiciel *QGIS*. Le modèle *SOLWEIG* estime la T_{mrt} en utilisant une méthode qui reproduit le corps humain comme étant un cylindre qui reçoit des rayonnements de courtes (K) et longues longueurs d'ondes (L) dans 6 directions différentes, soit de la surface vers l'atmosphère (K_{down} et L_{down}), du bas (K_{up} et L_{up}) et des quatre points cardinaux (K_{side} et L_{side}) (Figure 2.7). Afin de calculer la T_{mrt} , le modèle calcule la densité de flux de rayonnement médian (R_{str}) par la somme des flux radiatifs de courtes (K) et longues (L) longueurs d'onde, et ce en trois dimensions. Il prend également en compte le facteur d'angle, soit l'influence des surfaces avoisinantes sur un individu, en utilisant le FCV de la végétation (*Vegetation*

Ψ_{sky}), et le FCV des bâtiments (*Building Ψ_{sky}*) qui sont générés par les données de type MNS (*Vegetation DSMs* et *Ground & Building DSM*) (Figure 2.7). Les données MNS permettent également de connaître l'influence de l'ombre sur les zones d'études (*Shadow Fraction*), ainsi que le facteur de sol (Ψ_{ground}), et donc d'estimer les rayonnements sortant de courtes et longues longueurs d'onde (L_{up} et K_{up}) (Figure 2.7).

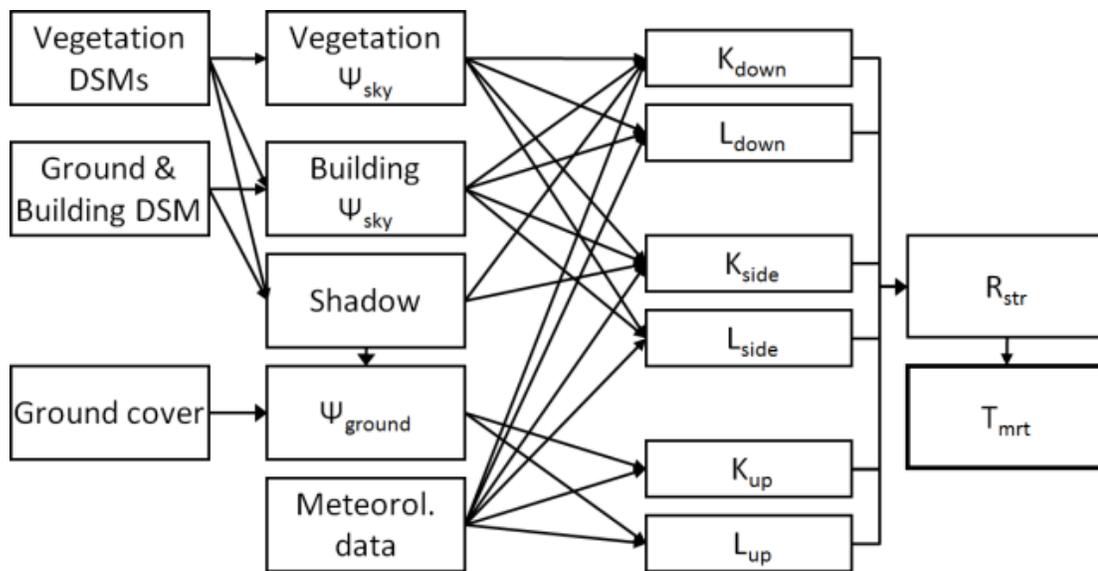


Figure 2.7 Résumé du fonctionnement du modèle SOLWEIG (Lindberg, 2008)

Celui-ci sera utilisé pour simuler différents scénarios d'aménagement. Il s'agira de réaliser 15 scénarios par zone d'étude (présentée à la Figure 2.1), soit un pour chacun des scénarios d'aménagement d'arbres (Nord, Nord/Sud, Nord/Est, Nord/Ouest, Nord/Sud/Ouest, Nord/Est/Ouest, Nord/Sud/Est, Sud, Sud/Est, Sud/Ouest, Sud/Est/Ouest, Est, Est/Ouest, Ouest Nord/Sud/Est/Ouest). Il est à noter que les points cardinaux mentionnés ici ne représentent pas les vrais, mais plutôt ceux en fonction de l'île de Montréal et de son azimuth particulier dans la vallée du Saint-Laurent. Il y aura également une modélisation par zone sans présence d'arbres. Suite à cela, il sera

possible de calculer la différence de T_{mrt} entre un scénario avec des arbres et sans arbres. Il faut prendre note que l'ensemble des modélisations seront réalisées sur seulement une seule journée, soit le 2 Juillet 2018, entre les heures de 5h30 et 20h30.

2.4.2 Élaboration des scénarios d'arbres

Comme mentionné précédemment, la modélisation avec SOLWEIG sera réalisée en fonction de 15 différents scénarios d'aménagement propre à chaque par zone d'étude. Chacun de ceux-ci se distingue par la disposition des arbres fictifs dans le cadre urbain, plus précisément, en fonction des axes routiers.

L'ensemble des scénarios ont été élaborés en se fiant à des images aériennes et des données vectorielles. Cela a rendu possible d'implanter les arbres à des endroits réalistes, soit en majorité sur les trottoirs. Pour planifier l'ensemble de ces scénarios, des entités vectorielles de type ligne ont été créées sur *ArcGis Pro* pour tous les trottoirs des zones d'étude. Les imageries aériennes sur Google Earth et l'information de l'occupation du sol de Montréal ont permis de placer adéquatement les lignes de plantation. Il faut également prendre en considération qu'aucun arbre ne fut aménagé en bordure des zones d'étude, car les tronçons de rues situées aux extrémités ne prennent pas en considération l'influence géométrique des bâtiments à l'extérieur des zones. C'est pourquoi les arbres furent plantés seulement sur les tronçons de rue à « l'intérieur » des zones d'étude.

Par la suite, les points générés doivent acquérir des dimensions géométriques. Pour ce faire, il faut ajouter des données dans leur table attributaire pour que *SOLWEIG* puisse interpréter les propriétés tridimensionnelles des arbres.

Les dimensions précises des arbres modélisés sont identiques. Cette uniformisation de leurs dimensions permet d'isoler l'influence du contexte urbain sur l'efficacité d'atténuation de chaleur des arbres. Dans un contexte où chaque arbre aurait une dimension distincte, il serait impossible de tirer des conclusions, en raison de la différence d'ombre que chacun générerait selon la dimension de la canopée.

Afin de connaître les dimensions de cet arbre universel, il faut choisir parmi les arbres les plus communs de l'île de Montréal. Il est nécessaire de sélectionner un arbre non seulement représentatif de la forêt urbaine montréalaise, mais également efficace pour atténuer la chaleur en raison de ses caractéristiques physiques. Selon le rapport de la biodiversité de 2013 réalisé par le LAB (*Local Action for Biodiversity*), certaines espèces sont plus fréquentes dans le contexte urbain montréalais :

Dans les quartiers de Montréal, on retrouve majoritairement comme arbre de rue : trois espèces d'érable, soit l'érable de Norvège, l'érable argenté, l'érable rouge ; deux espèces de frêne, le frêne de Pennsylvanie et le frêne d'Amérique ; deux espèces de tilleul, le tilleul d'Amérique et le tilleul à petites feuilles ; le févier d'Amérique ; l'orme de Sibérie ; ainsi que le micocoulier occidental (LAB, 2013, p.25).

L'ensemble des arbres cités par le rapport furent comparés et analysés afin de savoir lequel d'entre eux serait le plus approprié pour l'atténuation de la chaleur (Tableau 2.6). Finalement, l'érable argenté fut sélectionné. Il a été choisi parce qu'il est non seulement commun dans l'aménagement de Montréal, mais également, car il a une croissance rapide comparativement aux autres espèces citées. En effet, cet arbre a une croissance moyenne annuelle de presque 60 cm par année et atteint à pleine maturité une hauteur de 15 à 25 mètres. Sa largeur de canopée est à pleine maturité d'une dimension entre 11 et 15 mètres (Arbor Day Foundation, 2020). En raison de sa forte croissance et de sa

canopée constituée de feuillage large, celui-ci génère de l'ombre plus rapidement que d'autres espèces. Étant donné que cet aménagement est fictif et veut simuler un nouvel aménagement de canopée urbaine, il est préférable de prendre les dimensions de l'arbre lorsque celui-ci n'est pas à pleine maturité. Les dimensions sont donc celles d'un érable argenté de dix ans, ce qui équivaut à une hauteur de canopée maximale de huit mètres, un diamètre de canopée de cinq mètres, et une section de tronc de 2,5 mètres (U.S Department of Agriculture, 1990).

Tableau 2.6 Ensemble des arbres urbains communs de Montréal et leurs caractéristiques physiques

Nom commun	Nom latin	Croissance moyenne annuelle (cm)	Hauteur à pleine maturité (m)	Largeur de canopée à pleine maturité (m)
Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i>	60 et plus	15 à 25	11 à 15
Érable Norvège	<i>Acer platanoides</i>	50	12 à 18	10 à 15
Érable rouge	<i>Acer rubrum</i>	33 à 60	12 à 18	12
Frêne Pennsylvanie	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	60 et plus	15 à 18	7,5
Frêne d'Amérique	<i>Fraxinus americana</i>	33 à 60	15 à 24	12 à 15
Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i>	Donnée introuvable	23 à 37	9 à 15
Tilleul à petites feuilles	<i>Tilia cordata mill</i>	33 à 60	15 à 18	12
Le février	<i>Gleditsia triacanthos</i>	60 et plus	9 à 21	9 à 21
L'orme de Sibérie	<i>Zelkova carpinifolia</i>	Donnée introuvable	23 à 37	20

Donc, les dimensions de l'érable argenté de 10 ans sont ajoutées aux valeurs de la table attributive des points générés dans l'étape précédente.

Il faut noter que l'exercice théorique appliqué dans cette étude ne serait pas réalisable dans un contexte réel. La plantation uniforme de la même espèce amène des épidémies et d'autres problèmes comme nous connaissons avec l'agrile du frêne. L'exercice de planter le même arbre n'a pour but que d'isoler l'influence du contexte morphologique urbain et ne s'applique pas dans un contexte réel.

Finalement, il faut utiliser la fonction de la suite d'outil *UMEP* nommée *Tree Generator*. Les intrants sont : les points d'arbres générés, les MNS et MNT des zones d'étude. L'information sortante de cette fonction est un MNC et un TDSM (*Trunk Digital Surface Model*). Celle-ci pourra être utilisée dans le modèle *SOLWEIG*. Cette étape devra être répétée pour l'ensemble des 30 scénarios d'aménagement d'arbres. C'est avec les MNC et TDSM générés dans cette étape qu'il sera possible ensuite de produire les couches de *Sky View Factor*.

Le modèle *SOLWEIG* exige également de l'information sur l'occupation du sol. La méthodologie pour l'obtention de cette information a été expliquée précédemment dans la section 2.1 sur la zone d'étude.

2.5 Analyse des résultats

Le modèle *SOLWEIG* devra être exécuté 32 fois afin d'obtenir l'ensemble des résultats. Le traitement se produit 30 fois pour les scénarios de plantation d'arbres (15 par zone), et deux fois pour avoir les scénarios sans arbre. À chaque itération de la modélisation, le *SOLWEIG* génère une carte geoTIFF de type matriciel représentant la T_{mrt} au travers de la zone d'étude, et ce, à un intervalle 30 minutes du cadre temporel. De plus, pour chaque modélisation, de l'information météorologique sur chacun des points d'arbres à chaque

intervalle de temps est compilée. La boîte d'outils UMEP surnomme cette information POIs (*Point of Interests*) et ces derniers seront également analysés.

Afin de bien interpréter les résultats, il est important de distinguer les deux types de résultats. En effet, les POIs ne donnent que de l'information sur l'endroit précis de l'arbre. Au contraire, les cartes de T_{mrt} matricielle nous informent sur l'influence des arbres sur l'ensemble de la zone d'étude. La raison derrière l'analyse des POIs en plus des cartes T_{mrt} provient de l'intérêt à quantifier l'influence de chacun des arbres indépendamment du côté de rue sur lequel ceux-ci se situent. Grâce à l'information portant sur chacun des arbres, il est possible de réaliser une analyse plus pointue sur les facteurs ayant une incidence sur l'atténuation des arbres. Donc, l'analyse des résultats sera divisée en deux sections, soit une sur l'analyse des cartes matricielles et une autre sur l'analyse des POIs.

2.5.1 Analyse des cartes matricielles

Une fonction dans la suite d'outils UMEP permet d'analyser la T_{mrt} du sol. Cette fonction, nommée *SOLWEIG Analyser*, produit une carte qui donne la moyenne quotidienne de T_{mrt} en excluant les zones déterminées comme étant des bâtiments. Lors du traitement des modélisations, *SOLWEIG* crée une carte matricielle nommée « *Building Grid* », qui détermine la localisation des bâtiments. Lorsque cette couche est ajoutée à *SOLWEIG Analyser*, il est possible de soustraire les zones des bâtiments afin d'obtenir seulement les valeurs au niveau du sol. Étant donné que cette étude a pour but d'améliorer le confort thermique, il est important de prendre en considération seulement les endroits au niveau des rues. *SOLWEIG Analyser* prend donc l'ensemble des cartes de T_{mrt} générées à un intervalle de 30 minutes, et en réalise une de

la moyenne quotidienne de T_{mrt} au travers de la zone d'étude sans les bâtiments.

Par la suite, une autre moyenne doit être calculée. En effet, il faut quantifier la T_{mrt} moyenne des cartes produites par *SOLWEIG Analyser*. Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser une fonction dans QGIS, nommée *Information Raster*, qui calcule de multiples statistiques sur la valeur des pixels d'une couche de type matricielle désignée. Grâce à cette fonction, nous obtenons la valeur de la moyenne de T_{mrt} quotidienne au niveau du sol.

La moyenne de T_{mrt} quotidienne de chacun des scénarios avec des aménagements d'arbres est ensuite comparée à la température des scénarios où il n'y a pas présence d'arbre. Cette soustraction donne l'atténuation de T_{mrt} générée par les arbres.

Ensuite, étant donné que le nombre d'arbres est variable selon l'aménagement, il faut quantifier l'atténuation de la T_{mrt} selon la superficie de canopée de chacun des scénarios. On ne cherche pas l'atténuation la plus forte, mais plutôt l'atténuation la plus efficace. La moyenne quotidienne de T_{mrt} atténuée est divisée par la superficie totale de la canopée pour chaque scénario. Cette opération mathématique génère l'atténuation de T_{mrt} par mètre carré de canopée. Cela indique lequel des scénarios d'aménagement est le plus efficace pour atténuer la T_{mrt} .

De plus, deux graphiques sont produits, soit un pour chaque zone. Ces graphiques de points ont sur l'axe des X, la superficie de la canopée et sur Y, la T_{mrt} atténuée par le scénario d'aménagement d'arbres. Le graphique présente également la tendance linéaire afin de conclure s'il y a une relation ou non entre la quantité d'arbres et la diminution de la T_{mrt} . Deux tableaux sont

aussi réalisés. Ceux-ci sont composés de trois colonnes : la superficie de la canopée (m^2), la T_{mrt} atténuée ($^{\circ}C$) et la T_{mrt} atténuée par mètre carré.

2.5.2 Analyse des résultats POIs

L'exercice principal de l'analyse des POIs ressemble à celui des cartes matricielles. Effectivement, l'analyse POIs a été réalisée pour les scénarios avec et sans arbre. Grâce à ces résultats, il est possible de calculer la différence de T_{mrt} pour chaque point d'arbres. Pour ce faire, un code en langage Python 3 sera développé afin de compiler l'ensemble des résultats avec et sans arbre, et ainsi calculer la moyenne quotidienne de T_{mrt} pour chaque point, et soustraire les résultats entre les scénarios avec et sans arbres. Cela donne ultimement l'atténuation moyenne quotidienne de T_{mrt} pour chaque arbre.

De plus, il sera possible alors de quantifier la moyenne d'atténuation pour tous les côtés de rues. Nous saurons alors quel côté de rue atténué de manière plus efficace.

Ensuite, afin de bien quantifier le contexte dans lequel les arbres se situent, il est nécessaire de connaître le score FCV à l'endroit de chacun des POIs. Pour ce faire, la fonction *Extract value to point* disponible dans le logiciel *ArcGis Pro* est utilisée pour extraire la valeur des pixels à l'endroit où les arbres ont été positionnés. Nous allons donc extraire les valeurs de FCV produite à chaque point d'arbres. Avec cette information, une analyse de corrélation entre la T_{mrt} atténuée et le FCV sera réalisée dans le but de quantifier le lien potentiel entre ces deux variables.

Le même exercice va être réalisé avec les *Shadow Fraction*. Avec la couche de *Shadow Fraction*, nous utilisons l'outil *Extract value to point* pour connaître le score de *Shadow Fraction* à chaque point d'arbres. Cela permet d'établir la fraction ombragée moyenne pour chacun des arbres. Cet exercice sera réalisé une première fois sur l'ensemble de la journée (5h30 à 20h30), mais va également être appliqué pour les heures en matinée (5h30-12h) et en après-midi (12h-20h30). Les analyses de corrélation permettront de confirmer si la fraction ombragée affecte ou pas les valeurs de T_{mrt} selon la période de la journée, soit en fonction de l'ensoleillement d'après-midi ou d'avant-midi.

Donc, ces résultats, permettront d'identifier et d'évaluer les endroits les plus appropriés pour la plantation et pourquoi ils atténuent ou pas la chaleur de manière plus efficace. L'objectif ultime est de réaliser des recommandations sur les meilleurs endroits pour l'emplacement des arbres dans le cadre urbain, et ce, en fonction de la morphologie urbaine des zones d'étude.

CHAPITRE III : RÉSULTATS

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus avec le modèle SOLWEIG, et du contexte urbain dans lequel les résultats ont été produits. La première section des résultats présente l'analyse des caractéristiques du tissu urbain de notre région d'étude (deux secteurs analysés). La deuxième section présente les résultats associés à la modélisation et les scénarios d'implantation d'arbre.

3.1 Résultats de caractérisation du tissu urbain

Les caractéristiques concernant l'occupation du sol sont présentées au Tableau 3.1. Les deux zones d'études se distinguent par un cadre bâti différent, soit plus densément construit dans la zone de Ville-Marie occupant 48,27% comparativement à 44,52% dans la zone du Plateau (Tableau 3.1) (Données Montréal, 2020). De plus, l'occupation des trottoirs et des axes routiers varie considérablement d'une zone à l'autre; on y remarque une superficie plus élevée dans la zone de Ville-Marie que dans celle du Plateau Mont-Royal. La canopée est à l'inverse plus abondante dans le quartier du Plateau, couvrant 18,59% du territoire, pour seulement 4,03% dans Ville-Marie (Tableau 3.1)

Tableau 3.1 Statistiques des superficies d'occupation du sol des zones d'études (Données Montréal, 2020).

	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Superficie du cadre bâti en m ² (% de la superficie totale)	54593,61 (44,52%)	78379,98 (48,27%)
Superficie des trottoirs en m ² (% de la superficie totale)	10111 (8,25%)	21266,9 (13,09%)
Superficie de la canopée en m ² (% de la superficie totale)	22795,76 (18,59%)	6544,29 (4,03%)
Superficie des axes routiers et intersections en m ² (% de la superficie totale)	25560,01 (20,84%)	41272,68 (25,42%)
Superficie totale de la zone d'étude en m ²	122604	162375

Voici maintenant les statistiques du cadre bâti. Le premier indicateur à quantifier est la hauteur des bâtiments. La moyenne d'élévation des bâtiments de la zone de Ville-Marie est approximativement de 77,62 mètres, tandis que la zone du Plateau à une moyenne de 60,54 mètres (Tableau 3.2). Par contre, le point le plus élevé dans la zone de Ville-Marie est de 195,9 mètres tandis que la zone du Plateau Mont-Royal est de 100,2 mètres. Au contraire, le point le moins élevé dans la zone de Ville-Marie est de 35,5 m et de 47,7 m dans la zone du Plateau. Par conséquent, les deux quartiers se distinguent par la morphologie de leurs bâtiments, qui possèdent en moyenne des hauteurs plus élevées dans la zone de Ville-Marie que sur le Plateau Mont-Royal.

Tableau 3.2 Statistiques du cadre bâti, du FCV et du *Shadow Fraction* des zones d'étude (Données Montréal, 2020)

	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Azimut moyen des axes routiers (°)	303,4	303,6
Moyenne d'élévation des bâtiments (m)	60,54	77,62
Moyenne de largeur de rue (m)	15	25
Bâtiment le plus élevé (m)	100,2	195,9
Bâtiment le moins élevé (m)	47,7	35,5
Moyenne de FCV (sans arbres)	0,678666352	0,600720955
Moyenne de <i>Shadow Fraction</i> (AM et PM)	0,4062	0,4693
Moyenne de <i>Shadow Fraction</i> (AM)	0,4303	0,4724
Moyenne de <i>Shadow Fraction</i> (PM)	0,3723	0,4534

La largeur de rue est également distincte entre les deux zones. Effectivement, les rues dans la zone d'étude de Ville-Marie sont en moyenne d'environ 25 mètres de largeur, et de 15 mètres dans la zone du Plateau Mont-Royal (Table 3.2).

L'angle des rues des deux quartiers est similaire. En effet, la zone de Ville-Marie et du Plateau Mont-Royal présente un azimut d'approximativement 303 degrés (Tableau 3.2). Cet angle est très proche de l'azimut du nord géographique moyen de l'ensemble du réseau routier de la ville de Montréal qui est de 305 degrés. On remarque que cet angle a une influence sur l'ensoleillement des rues. En effet, d'après les valeurs de *Shadow Fraction*, on constate qu'il y a plus d'ombres en matinée qu'en après-midi. Rappelons-nous que le *Shadow Fraction* signifie le pourcentage d'ombre à un endroit fixe sur une période donnée. Un score de 1 signifie qu'il y a eu de l'ombre sur l'ensemble de la période donnée, tandis que 0 équivaut à une absence totale d'ombrage. Effectivement, la valeur du *Shadow Fraction* des heures en

matinée est de 0,4303 pour la zone du Plateau et 0,4724 pour la zone Ville-Marie. Les valeurs du *Shadow Fraction* des heures en après-midi pour le Plateau Mont-Royal et Ville-Marie sont respectivement moins élevées avec 0,3723 et 0,4534. Donc, l'angle particulier des quartiers fait en sorte qu'il y a une plus de soleil au sol en après-midi.

La valeur du FCV moyen dans la zone du Plateau est d'environ 0,67 (Figure 3.1) tandis que la zone de Ville-Marie est de 0,6 (Figure 3.2). Cela nous indique que la zone Ville-Marie a en moyenne une plus forte présence du phénomène de canyon urbain en raison des bâtiments qui sont plus élevés que ceux dans la zone du Plateau-Mont-Royal ainsi qu'une densité de cadre bâti plus forte. L'ombrage généré par les gratte-ciels de la zone de Ville-Marie s'observe par le score de FCV qui est plutôt faible dans les tronçons routiers. Donc les rues de cette zone ne reçoivent pas beaucoup de rayonnement solaire durant la journée.



Figure 3.1 Facteur Ciel Vu de la zone du Plateau Mont-Royal



Figure 3.2 Facteur Ciel Vu de la zone de Ville-Marie

Les valeurs du *Shadow Fraction*, sont présentées pour l'ensemble de la journée (5h30- 20h30) dans les Figures 3.3 et 3.4, et ensuite les valeurs pour les heures en matinée (5h30-12h) dans les Figures 3.5 et 3.6 et les heures en après-midi (12h-20h30) dans les Figures 3.7 et 3.8.



Figure 3.3 *Shadow Fraction* de l'ensemble des heures diurnes de la zone du Plateau Mont-Royal



Figure 3.4 *Shadow Fraction* des heures AM de la zone du Plateau Mont-Royal



Figure 3.5 *Shadow Fraction* des heures PM de la zone du Plateau Mont-Royal

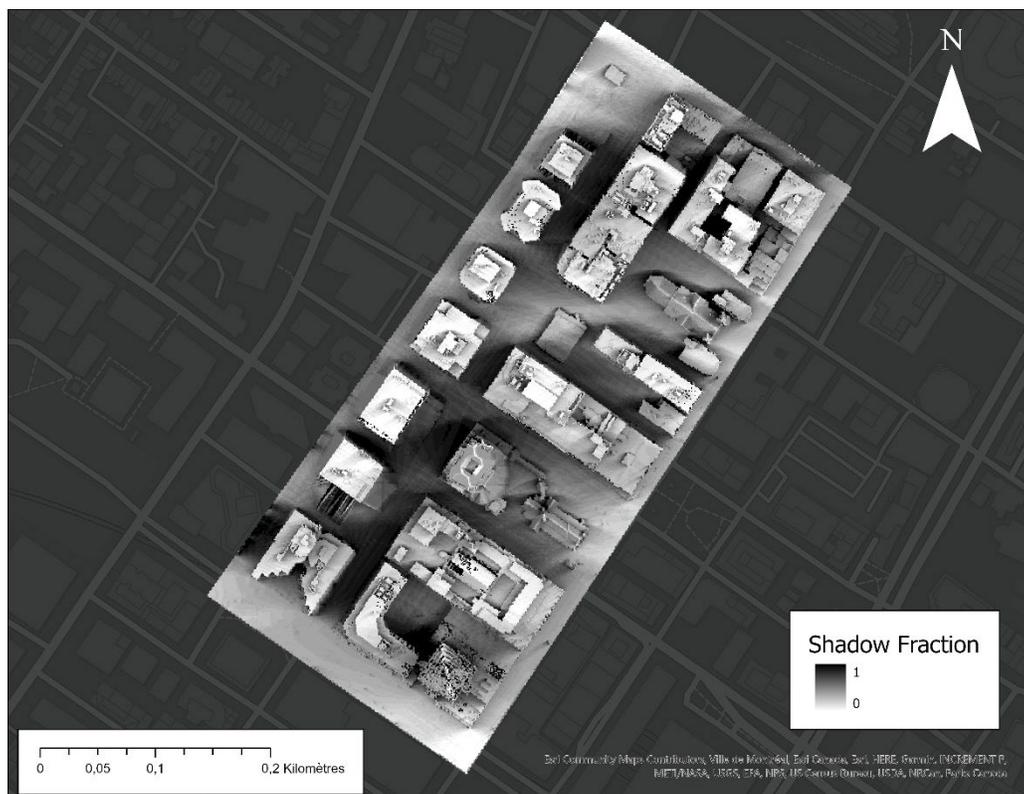


Figure 3.6 *Shadow Fraction* de l'ensemble des heures diurnes de la zone de Ville-Marie

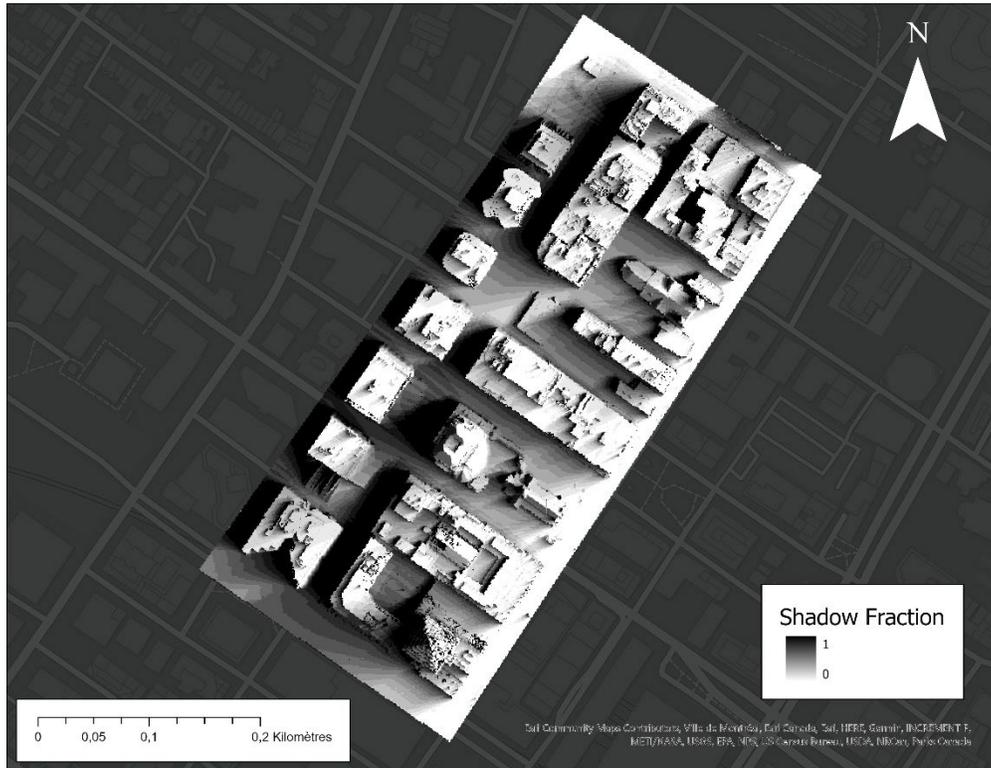


Figure 3.7 *Shadow Fraction* des heures AM de la zone de Ville-Marie

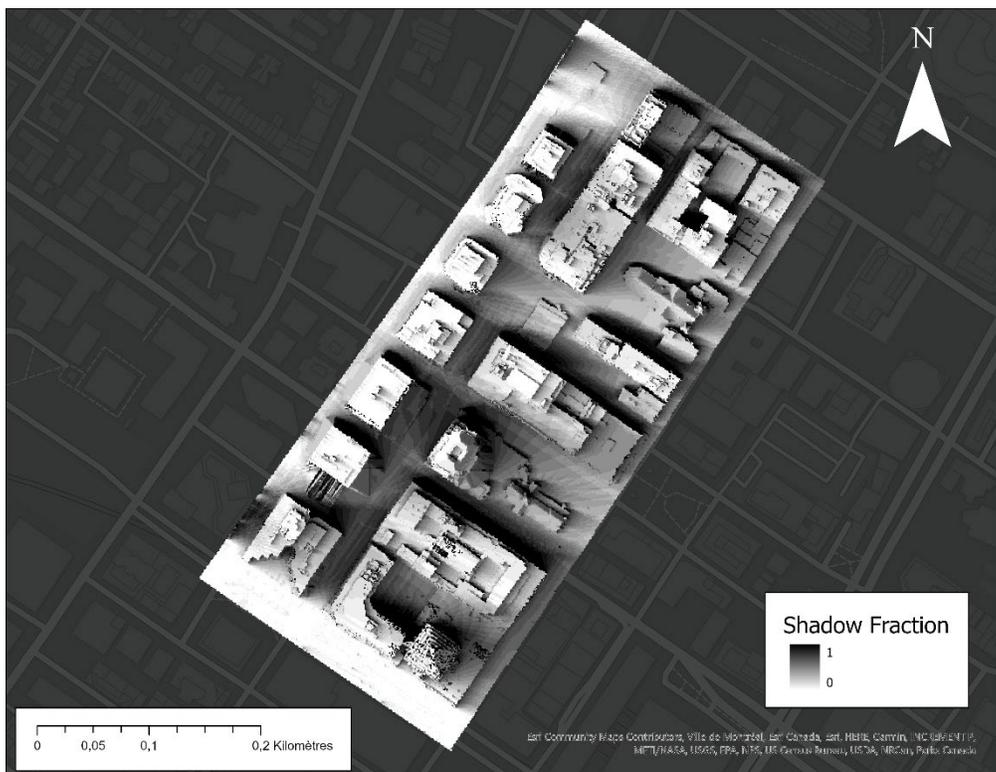


Figure 3.8 *Shadow Fraction* des heures PM de la zone de Ville-Marie

Les valeurs moyennes de *Shadow Fraction* (Tableau 3.2) varient d'une zone à l'autre, signifiant la quantité d'ombre reçue en surface différente selon le lieu. En effet, la zone de Ville-Marie possède des valeurs de 0,46 ce qui signifie qu'en moyenne 46% de la zone d'étude est ombragée durant la journée. La zone du Plateau Mont-Royal présente des valeurs de 0,4, donc une plus grande quantité de rayonnement solaire que Ville-Marie. Ceci est en accord avec les différences dans le cadre bâti et les valeurs du FCV présentées précédemment, les endroits avec des hauteurs de bâtiments plus élevées génèrent plus d'ombre au sol. On remarque également l'influence de l'ensoleillement au cours de la journée. Dans les cartes matinales, on voit que l'ombre se fait plus de l'Est vers l'Ouest (Figures 3.4 et 3.7), déterminé par la position du soleil par rapport au lieu en matinée. Tandis que sur les cartes des heures PM (Figures 3.5 et 3.8), l'ombre se fait plutôt de l'Ouest vers l'Est. Cela s'explique par la trajectoire du soleil durant la journée et ces ombres distinctes seront utiles dans l'interprétation des résultats.

3.2 Résultats de la modélisation

Seize tests de sensibilité ont été réalisés par zone avec le modèle *SOLWEIG*, dont 15 avec la présence d'une canopée fictive et sans présence de canopée. Au total, 32 scénarios de modélisation furent réalisés et les résultats ont été compilés pour chaque zone d'étude.

3.2.1 Scénarios d'aménagement d'arbres

Les Figures 3.9 et 3.10 présentent l'ensemble des points de plantation d'arbres fictifs au travers des deux zones d'études. Les modélisations furent réalisées à partir d'une multiple combinaison de cet ensemble de points en fonction de l'emplacement des arbres sur les tronçons de rues.



Figure 3.9 Points de plantation des arbres fictifs de la zone du Plateau Mont-Royal



Figure 3.10 Points de plantation d'arbres fictifs de la zone de Ville-Marie

3.2.2 Cartes de T_{mrt}

Le modèle *SOLWEIG* permet de générer des cartes de type geoTIFF représentant la T_{mrt} dans chaque zone d'étude à chaque 30 minutes entre 5h30 et 20h30 le 2 Juillet 2018. Les moyennes quotidiennes de T_{mrt} pour les scénarios sans aménagement d'arbre et avec l'ensemble des points de plantation sont présentées aux Figures 3.11, 3.12, 3.13 et 3.14.



Figure 3.11 Carte de T_{mrt} moyenne des heures diurnes sans présence d'arbres fictifs de la zone du Plateau Mont-Royal



Figure 3.12 Carte de T_{mrt} moyenne des heures diurnes avec l'ensemble des arbres fictifs de la zone du Plateau Mont-Royal

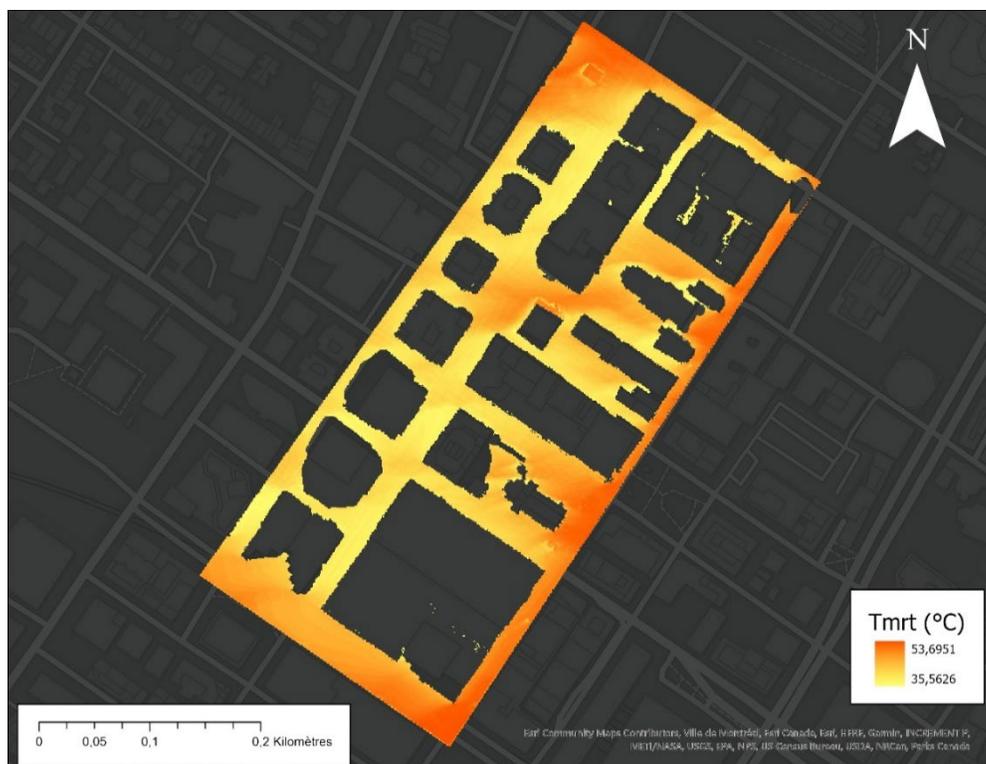


Figure 3.13 Carte de T_{mrt} moyenne des heures diurnes sans présence d'arbres fictifs de la zone de Ville-Marie

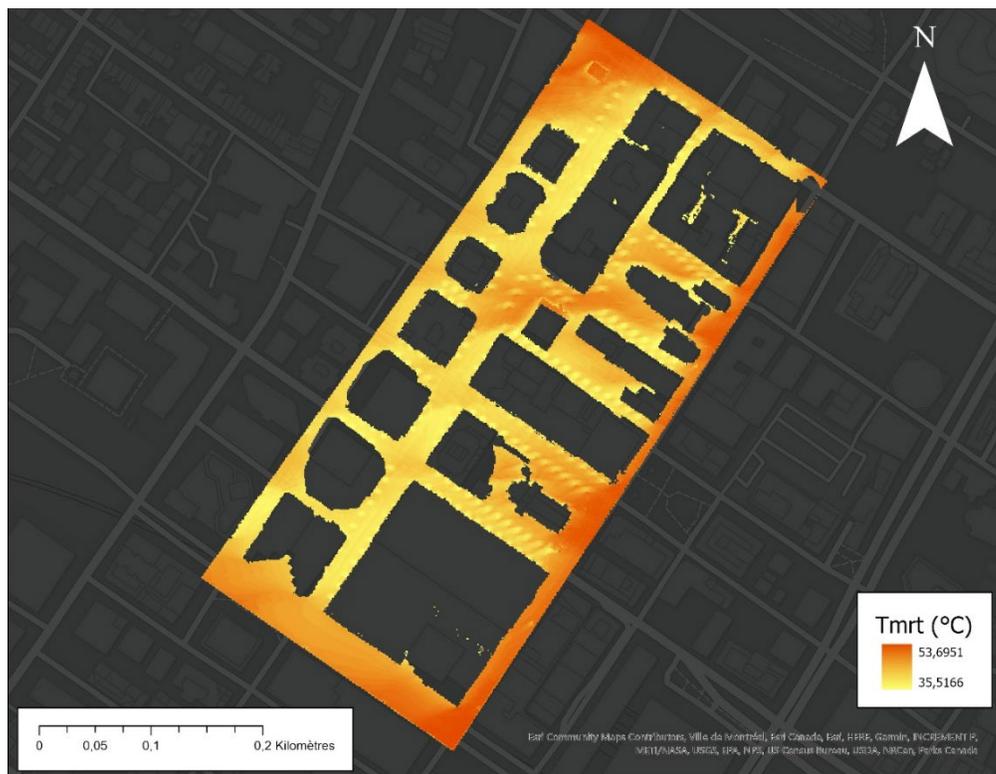


Figure 3.14 Carte de T_{mrt} moyenne des heures diurnes avec l'ensemble des arbres fictifs de la zone de Ville-Marie

Tableau 3.3 Moyennes quotidiennes de T_{mrt} des heures diurnes (5h30-20h30) du 2 Juillet 2018

Scénarios d'aménagement	Zone Plateau Mont-Royal (°C)	Zone Ville-Marie (°C)
Est	44,14	43,96
Est/Ouest	43,93	43,84
Nord	44,36	44,04
Nord/Est	43,99	43,89
Nord/Est/Ouest	43,78	43,77
Nord/Sud	44,27	43,99
Nord/Sud/Est	43,90	43,84
Nord/Sud/Ouest	44,04	43,87
Nord/Ouest	44,14	43,92
Sud	44,41	44,06
Sud/Est	44,04	43,91
Sud/Est/Ouest	43,83	43,79
Sud/Ouest	44,18	43,94
West	44,28	43,98
Nord/Sud/Est/Ouest	43,68	43,72
Pas d'arbres	44,51	44,10

Cette compilation de la moyenne spatiale de la T_{mrt} nous démontre qu'en moyenne la température est légèrement plus élevée dans le quartier du Plateau Mont-Royal. En effet, cette différence est en moyenne de 0,16 °C.

Les résultats sur la T_{mrt} moyenne quotidienne ont ensuite permis de calculer la T_{mrt} quotidienne atténuée pour chaque scénario par la soustraction des scénarios sans arbre avec ceux où il y a présence d'arbre :

Tableau 3.4 Tableau de réduction de T_{mrt} moyenne quotidienne des heures diurnes (5h30-20h30) du 2 Juillet 2018

Scénarios d'aménagement	Zone Plateau Mont-Royal (°C)	Zone Ville-Marie (°C)
Est	0,36	0,15
Est/Ouest	0,58	0,27
Nord	0,14	0,06
Nord/Est	0,51	0,21
Nord/Est/Ouest	0,72	0,39
Nord/Sud	0,24	0,11
Nord/Sud/Est	0,61	0,26
Nord/Sud/Ouest	0,46	0,23
Nord/Ouest	0,37	0,18
Sud	0,10	0,05
Sud/Est	0,46	0,20
Sud/Est/Ouest	0,68	0,31
Sud/Ouest	0,32	0,17
Ouest	0,22	0,12
Nord/Sud/Est/Ouest	0,82	0,38

On peut observer que peu importe l'aménagement ou même la zone, la T_{mrt} n'a pas diminué de plus de 1°C. Cette diminution peut sembler minime, mais il faut se rappeler que cette moyenne est réalisée sur l'ensemble des endroits au niveau du sol. On calcule donc également dans cette moyenne des endroits qui ont potentiellement été aucunement affectés par les aménagements d'arbres. Cela explique potentiellement la faible diminution de T_{mrt} qui a été compilée.

On observe également que dans les deux zones d'études, le scénario Nord/Sud/Est/Ouest est celui qui a généré la plus forte diminution de T_{mrt} . Ces résultats ne sont pas surprenants considérant qu'il s'agit du scénario qui

présente la plus grande quantité d'arbres. Les Figures 3.15, 3.16 présentent la régression linéaire et les liens de corrélation (via le coefficient de détermination) entre la superficie de la canopée en m^2 et la T_{mrt} moyenne quotidienne diminuée dans chaque scénario (Figures 3.15, 3.16). En effet, les valeurs très élevées du coefficient de détermination de 0,9581 dans la zone de Ville-Marie et de 0,9404 dans la zone du Plateau Mont-Royal révèle que la superficie de canopée a une influence directe et significative sur la baisse de température.

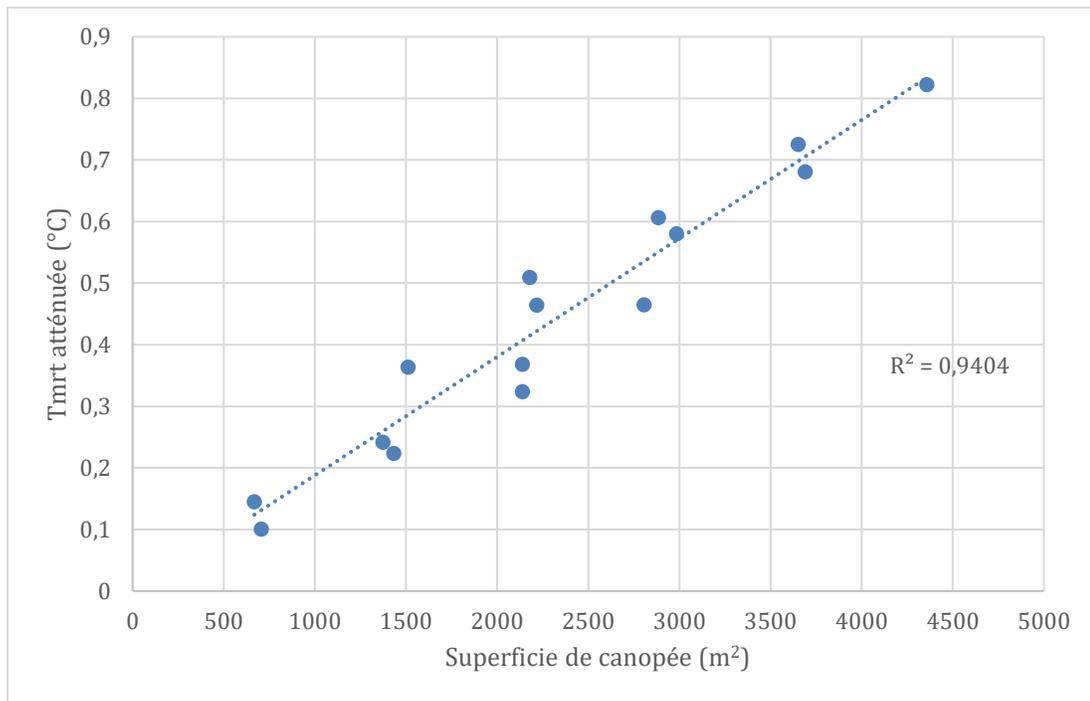


Figure 3.15 Graphique de T_{mrt} atténuée des différents scénarios d'aménagement en relation avec la superficie de canopée en m^2 de la zone du Plateau Mont-Royal

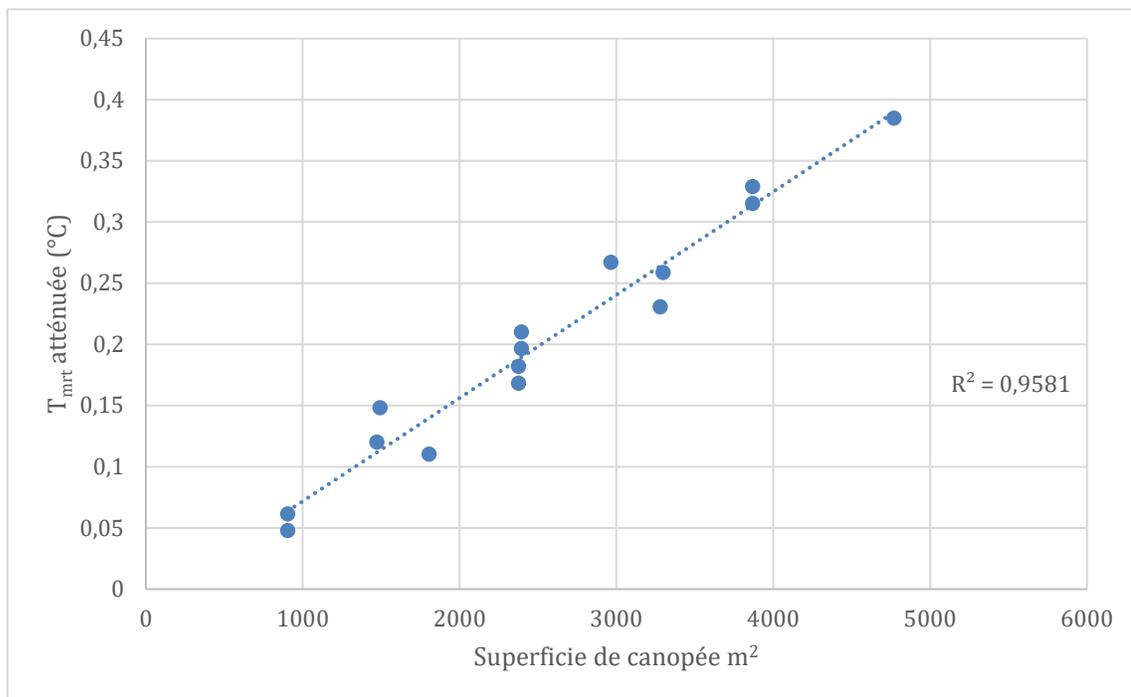


Figure 3.16 Graphique de T_{mrt} atténuée des différents scénarios d'aménagement en relation avec la superficie de canopée en m^2 de la zone Ville-Marie

Une analyse plus approfondie des résultats de la zone du Plateau Mont-Royal. On remarque la plus forte réduction de la T_{mrt} est obtenu avec le scénario Nord/Sud/Est/Ouest ($0,82^{\circ}C$) puis est le scénario Nord/Est/Ouest ($0,72^{\circ}C$). Puis avec Sud/Est/Ouest ($0,68^{\circ}C$) et Nord/Sud/Est ($0,61^{\circ}C$) (Tableau 3.4). On constate ici que le point commun pour l'ensemble des scénarios ayant la plus forte atténuation est la présence des arbres du côté Est des axes routiers. Au contraire, le scénario ayant atténué le moins de T_{mrt} est celui où les arbres sont situés du côté Sud ($0,1^{\circ}C$), suivis de près par ceux placés du côté Nord ($0,14^{\circ}C$) (Tableau 3.3).

Dans le cas de la zone Ville-Marie, les scénarios qui ont la plus forte réduction sont les scénarios Nord/Sud/Est/Ouest ($0,38^{\circ}C$) et le Nord/Est/Ouest ($0,33^{\circ}C$), puis les scénarios Sud/Est/Ouest ($0,31^{\circ}C$) et Est/Ouest ($0,27^{\circ}C$) (Tableau 3.4).

À l'inverse, la plus faible diminution de T_{mrt} correspond au scénario Sud avec une atténuation de $0,05^{\circ}\text{C}$ et au bas du classement, se trouve également le scénario Nord ($0,061459365^{\circ}\text{C}$) (Tableau 3.4). Cette faible atténuation des arbres au Sud ressemble aux résultats obtenus dans l'autre zone d'étude et mériterait une analyse plus approfondie.

Après une analyse des deux zones d'étude, il semblerait clair que l'atténuation de la T_{mrt} est plus prononcée dans la zone du Plateau Mont-Royal. En effet, la moyenne d'atténuation est de $0,44^{\circ}\text{C}$ pour la zone du Plateau Mont-Royal tandis qu'elle est de $0,20^{\circ}\text{C}$ pour la zone de Ville-Marie. Cette plus forte atténuation pourrait être potentiellement liée au score du FCV. De plus, on note que dans les deux cas se sont les scénarios Nord/Sud/Est/Ouest qui atténuent le plus la chaleur et les scénarios Sud et Nord qui semblent atténués le moins. Cette faible atténuation s'explique par le fait que ce sont ces scénarios qui ont la superficie de canopée la plus faible parmi tous les scénarios utilisés (Tableau 3.5).

Suite à la compilation des atténuations totales, il faut maintenant calculer l'atténuation de T_{mrt} par m^2 de canopée d'arbre des différents scénarios d'aménagement.

Tableau 3.5 Superficie des canopées en m² et atténuation de T_{mrt} par m² de canopée pour l'ensemble des scénarios d'aménagement des deux zones d'études

Scénarios d'aménagement	M ² de canopée		T _{mrt} atténuée (°C) / m ²	
	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Est	1511,51	1491,88	0,000240399	0,0000993949
Est/Ouest	2983,76	2964,13	0,000194255	0,0000901052
Nord	667,42	902,98	0,000216996	0,0000680628
Nord/Est	2178,93	2394,86	0,000233583	0,0000877503
Nord/Est/Ouest	3651,18	3867,11	0,000198604	0,0000850499
Nord/Sud	1374,1	1805,96	0,000175829	0,0000610260
Nord/Sud/Est	2885,61	3297,84	0,000210077	0,0000784705
Nord/Sud/Ouest	2807,09	3278,21	0,000165564	0,0000703395
Nord/Ouest	2139,67	2375,23	0,000172	0,0000766292
Sud	706,68	902,98	0,000142009	0,0000531167
Sud/Est	2218,19	2394,86	0,000209269	0,0000820943
Sud/Est/Ouest	3690,44	3867,11	0,000184369	0,0000815218
Sud/Ouest	2139,67	2375,23	0,000151226	0,0000708907
Ouest	1432,99	1472,25	0,000155804	0,0000815926
Nord/Sud/Est/Ouest	4357,86	4770,09	0,000188703	0,0000806726

Encore une fois ici on observe que l'atténuation est plus élevée dans la zone du Plateau Mont-Royal. En effet, la moyenne d'atténuation par m² de canopée pour l'ensemble des scénarios est de 0,000189246°C pour le Plateau Mont-Royal tandis qu'elle est de 0,0000777811°C dans le quartier Ville-Marie.

Dans la zone du Plateau Mont-Royal, on constate que ce sont les scénarios Est et Nord qui ressortent comme étant ceux qui atténuent le plus la T_{mrt}. Effectivement, le scénario Est diminue la T_{mrt} de 0,000240399°C par m², le scénario Nord/Est de 0,000233583°C et le scénario Nord de 0,000216996°C. À l'inverse les scénarios les moins performants sont ceux du Sud et de l'Ouest.

Le scénario Sud diminue de $0,000142009^{\circ}\text{C}$, le scénario Sud/Ouest de $0,000151226^{\circ}\text{C}$ et le scénario Ouest de $0,000155804^{\circ}\text{C}$.

On obtient des résultats légèrement différents dans la zone de Ville-Marie, avec le scénario Est ayant également de plus fortes atténuations que le reste des scénarios. Le scénario Est a généré la plus grande diminution soit de $0,0000993949^{\circ}\text{C}$ par m^2 , le scénario Est/Ouest de $0,0000901052^{\circ}\text{C}$ et le scénario Nord/Est de $0,000116125^{\circ}\text{C}$. Similairement aux résultats de la zone du Plateau, c'est le scénario Sud qui est le plus faible dans l'atténuation par m^2 . En effet, le scénario Sud atténue de $0,0000531167^{\circ}\text{C}$, et le scénario Nord/Sud atténue de $0,0000610260^{\circ}\text{C}$.

Donc, dans les deux zones, nous observons que ce sont les arbres positionnés sur le côté Est des rues qui permettent d'atténuer la T_{mrt} de manière efficace. Au contraire, ce sont les côtés Sud et Ouest qui semblent les moins efficaces à diminuer la T_{mrt} . On remarque donc ici qu'il y a potentiellement des acquis qui pourraient s'appliquer dans d'autres contextes montréalais. Par contre, il est nécessaire de se rappeler que l'écart entre les scénarios qui atténuent le plus et le moins efficacement la T_{mrt} est plutôt minime. Dans la zone Ville-Marie, on parle d'un écart de $0,0000462782^{\circ}\text{C}$, et de $0,0000983904^{\circ}\text{C}$.

3.2.3 Résultats des POIs (*Points of interests*)

Les POIs, rappelons-nous, correspondent aux statistiques extrapolées aux endroits précis où sont placés chacun des arbres. On parle donc ici de données ponctuelles et non d'évaluer les valeurs spatiales pour l'ensemble des zones d'études comme analysé précédemment. On considère 222 points de plantation dans la zone du Plateau-Mont-Royal et 243 dans la zone de Ville-

Marie. Le grand nombre de points explique pourquoi les résultats seront présentés avec des cartes plutôt que de façon tabulaire.



Figure 3.17 Carte de T_{mrt} atténuée moyenne quotidienne pour chacun des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal

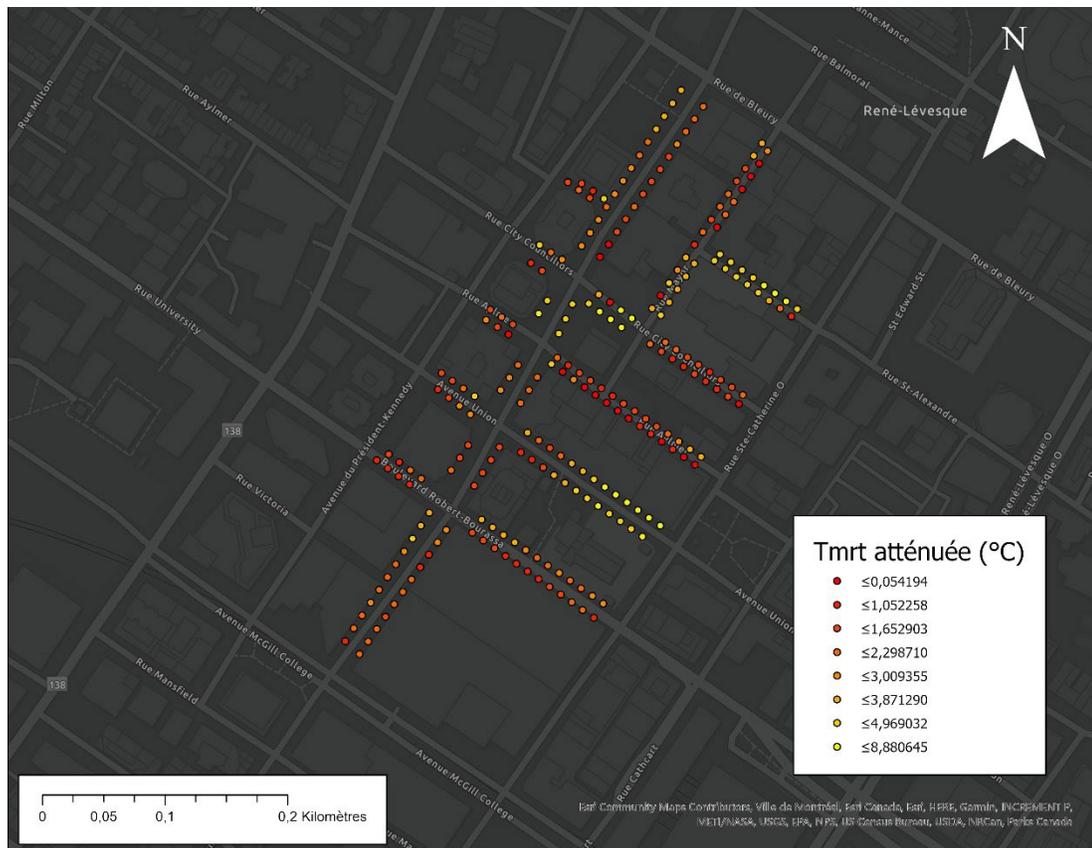


Figure 3.18 Carte de T_{mrt} atténuée moyenne quotidienne pour chacun des POIs de la zone de Ville-Marie

Le premier élément à noter est le fait que les diminutions de T_{mrt} sont beaucoup plus grandes ici que dans l'analyse des cartes de T_{mrt} présentés dans la section 3.2.2 (Figures 3.17 et 3.18). Il faut se rappeler que la diminution des POIs est calculée seulement directement selon la position de chaque arbre et non au travers de la zone comme lors des cartes analysées précédemment. Cela explique donc pourquoi l'impact sur les températures de surface est plus significatif.

On observe pour les deux zones qu'il y a une très forte variabilité d'atténuation sur l'ensemble des POIs. En effet, dans la zone du Plateau Mont-Royal, l'atténuation maximale générée par un arbre est de 6,87°C, l'atténuation minimale est de 0°C, la moyenne d'atténuation est de 3,64°C et l'écart type est de 1,85°C. Un écart similaire est présent dans la zone de Ville-Marie avec une

diminution maximale de 8,880645°C, une atténuation minimale de -0,899677°C, une moyenne de 2,34°C et un écart type de 1,58°C. Encore une fois ici, on observe que l'atténuation est en moyenne plus forte dans la zone du Plateau Mont-Royal que la zone de Ville-Marie, mais ponctuellement plus élevée dans le cas de cette dernière zone.

On observe dans les résultats que plusieurs arbres dans la zone Ville-Marie n'atténuent pas la T_{mrt} , mais au contraire l'augmentent. L'ensemble de ces arbres sont localisés sur le côté Ouest des routes, mais rien ne semble expliquer en dehors de ce facteur spécifiquement cette anomalie. Elle pourrait être potentiellement due à une erreur dans le système de modélisation *SOLWEIG*. Certaines études ont observé des effets de surestimation ou de sous-estimation de la T_{mrt} par *SOLWEIG* lorsque la mesure était prise entre une zone ombragée et ensoleillée (Gál et Kántor, 2020). Cette anomalie est peut-être générée par une sous-estimation erronée par le modèle. Donc, une analyse plus poussée sur cette anomalie serait pertinente afin de distinguer si celle-ci est causée par une erreur dans le modèle ou les conditions réelles du positionnement de l'arbre.

Afin de synthétiser l'influence du côté de tronçon de rue, les moyennes d'atténuation pour les côtés Est, Ouest, Nord et Sud furent compilées dans un tableau (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 Moyennes d'atténuation de T_{mrt} (°C) quotidienne des POIs en fonction de l'emplacement sur les tronçons routiers

	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Nord	5,05	2,48
Sud	2,99	1,92
Est	4,78	2,90
Ouest	2,13	1,93

En résumé, ce sont les arbres plantés sur les côtés Nord et Est qui atténuent le plus la T_{mrt} (Tableau 3.6). Ce que l'on peut retenir ici est le fait que les côtés Sud et Ouest, une fois de plus, atténuent moins la T_{mrt} que les côtés Nord et Est.

En plus de faire une analyse des côtés de rue, nous avons évalué le positionnement des arbres en fonction de la direction de l'axe routier sur lequel ils se situent (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 Moyennes d'atténuation de T_{mrt} (°C) quotidienne des POIs en fonction de la direction du tronçon routier

	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Nord/Sud	3,479313	2,420773
Est/Ouest	3,990415	2,202756

On constate dans la zone du Plateau Mont-Royal ce sont les arbres placés sur les rues avec une direction Est/Ouest qui ont une atténuation supérieure. Tandis que ce sont ceux placés sur les rues en direction Nord/Sud pour l'autre zone. Cela est probablement dû au cadre bâti distinct des deux zones qui influence l'ombre au travers des zones différemment.

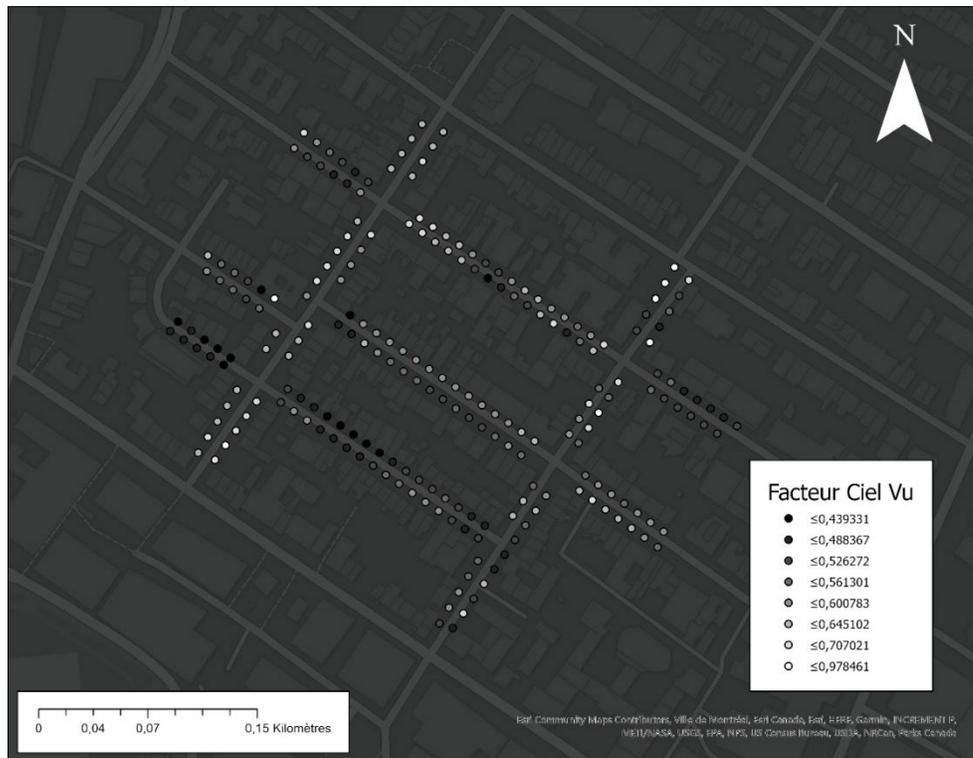


Figure 3.19 Carte du Facteur Ciel Vu des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal

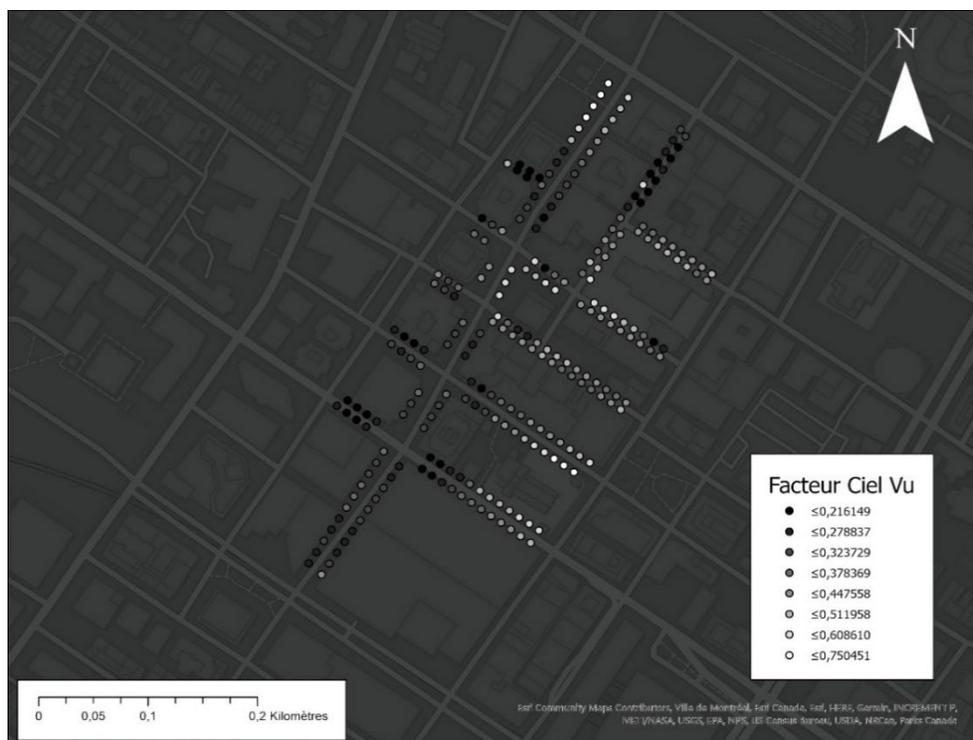


Figure 3.20 Carte du Facteur Ciel Vu des POIs de la zone Ville-Marie

Similairement à l'atténuation de T_{mrt} , on calcule maintenant la moyenne de FCV pour chacun des côtés de rue et des directions de rue :

Tableau 3.8 Moyenne du Facteur Ciel Vu des POIs en fonction de l'emplacement sur les tronçons routiers

	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Nord	0,622918	0,359088
Sud	0,614703	0,33999
Est	0,538746	0,363078
Ouest	0,540477	0,393625

Tableau 3.9 Moyenne du Facteur Ciel Vu des POIs en fonction de la direction des tronçons routiers

Direction du tronçon routier	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Nord/Sud	0,541835	0,349539
Est/Ouest	0,618693	0,378251

Les côtés de rue avec les valeurs du FCV moyen les plus élevées sont les côtés Ouest pour la zone de Ville-Marie, et le côté Nord pour la zone du Plateau Mont-Royal (Tableau 3.8). Pour le positionnement des arbres selon la direction de la rue, il semble que pour les deux zones ce soit la direction Est/Ouest où le score FCV est plus élevé (Tableau 3.9).

Cette information devient d'autant plus intéressante lorsqu'on la compare avec la T_{mrt} atténuée de chacun des POIs.

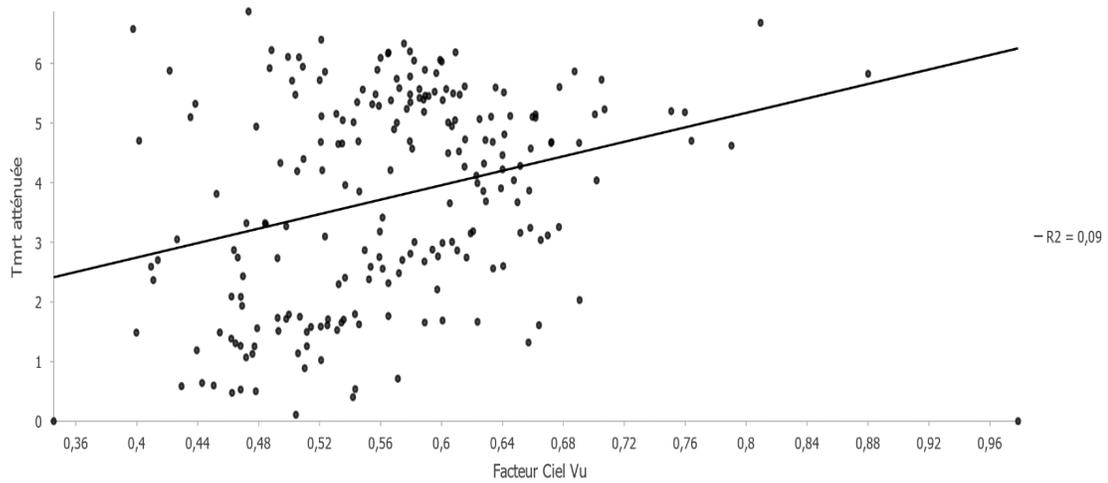


Figure 3.21 Graphique de la relation entre l'atténuation de la T_{mrt} quotidienne et le Facteur Ciel Vu (FCV) des POIs dans la zone du Plateau Mont-Royal

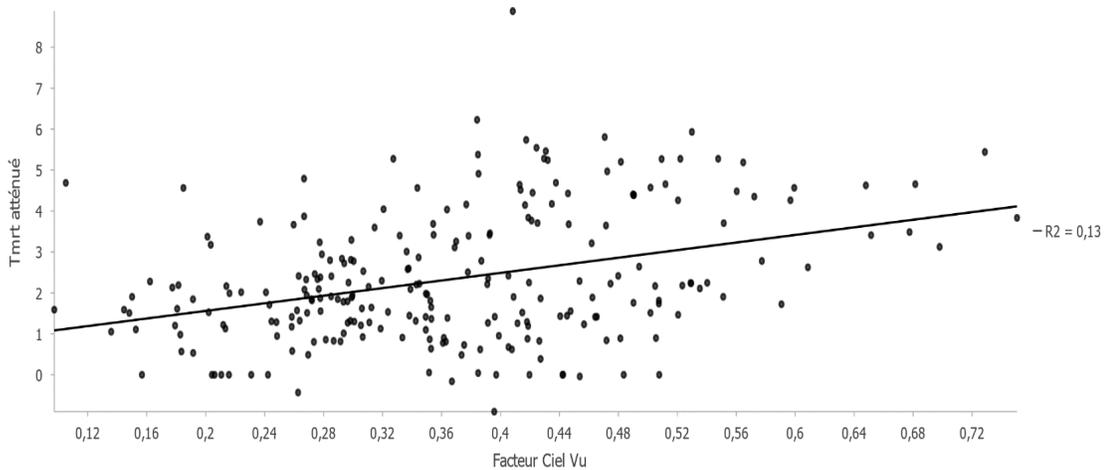


Figure 3.22 Graphique de la relation entre l'atténuation de la T_{mrt} quotidienne et le Facteur Ciel Vu (FCV) des POIs dans la zone de Ville-Marie

On remarque ici, par le coefficient de détermination (R^2) des deux graphiques, la corrélation entre le FCV et T_{mrt} n'est pas très significative. On observe que le R^2 est légèrement plus fort dans la zone de Ville-Marie (0,13) que dans la zone du Plateau Mont-Royal (0,11). Par le faible score de coefficient de

détermination, on peut conclure que le FCV n'a pas un grand impact sur l'atténuation de T_{mrt} générée par un arbre.



Figure 3.23 Carte du *Shadow Fraction* moyen des POIs sur l'ensemble des heures diurnes (5h30 – 20h30) du 2 Juillet 2018 dans la zone du Plateau Mont-Royal

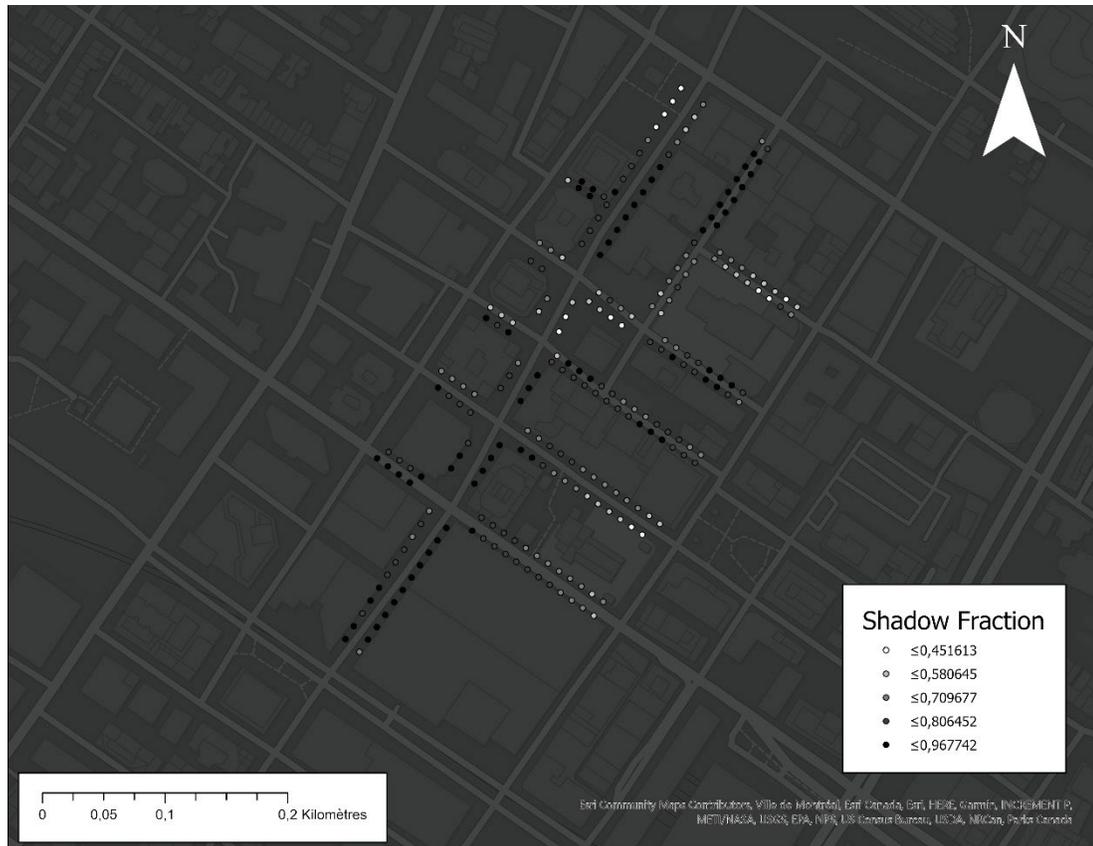


Figure 3.24 Carte du *Shadow Fraction* moyen des POIs sur l'ensemble des heures diurnes (5h30-20h30) du 2 Juillet 2018 dans la zone de Ville-Marie

Voici maintenant les scores de *Shadow Fraction* selon le côté de rue et la direction de la rue sur lequel les arbres se situent (Tableaux 3.9 et 3.10).

Tableau 3.10 Moyenne du *Shadow Fraction* des POIs en fonction de l'emplacement sur les tronçons routiers

	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Nord/Sud	0,542	0,702
Est/Ouest	0,541	0,768

Maintenant, voyons voir si le *Shadow Fraction* à une certaine corrélation avec la diminution de T_{mrt} .

Table 3.11 Moyenne du *Shadow Fraction* des heures diurnes (5h30-20h30) des POIs en fonction de la direction du tronçon routier

	Plateau Mont-Royal	Ville-Marie
Nord	0,49	0,74
Sud	0,59	0,79
Est	0,43	0,68
Ouest	0,65	0,72

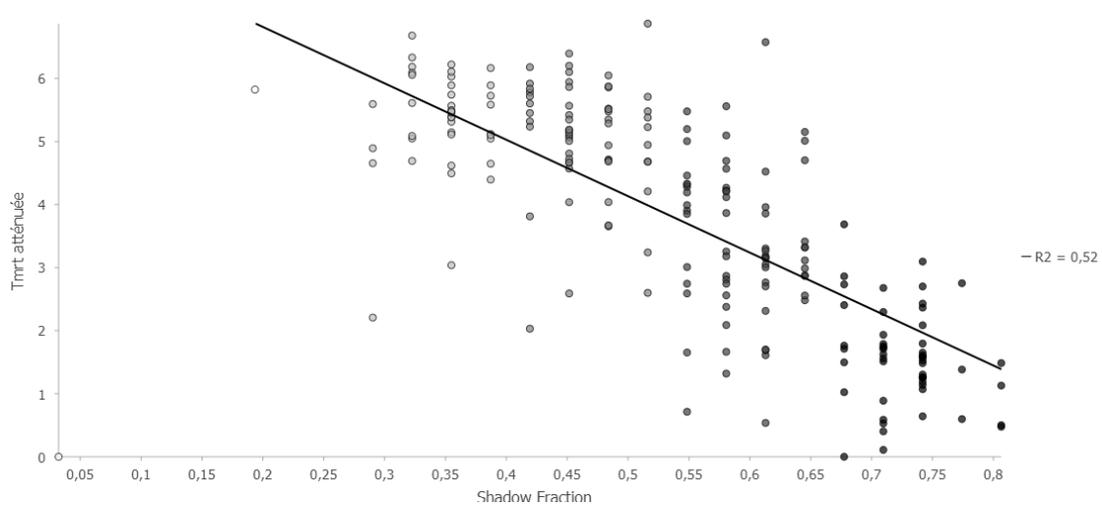


Figure 3.25 Graphique de la relation entre l'atténuation quotidienne de T_{mrt} et le *Shadow Fraction* moyen des heures diurnes des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal

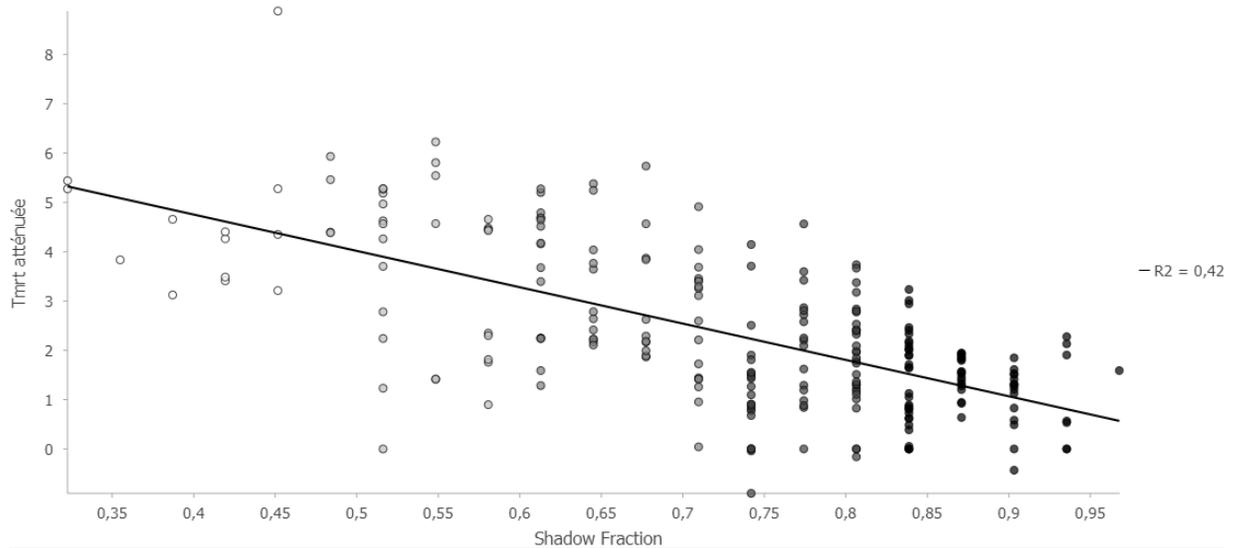


Figure 3.26 Graphique de la relation entre l'atténuation quotidienne de T_{mrt} et le *Shadow Fraction* moyen des heures diurnes des POIs de la zone de Ville-Marie

On constate ici un coefficient de détermination plus élevé pour les deux zones. En effet, on voit que le score R^2 est de 0,52 pour la zone du Plateau Mont-Royal et de 0,42 pour la zone de Ville-Marie (Figures 3.25 et 3.26).

Il faut maintenant regarder les résultats pour le *Shadow Fraction* en avant-midi et après-midi afin de déterminer à quelle période de la journée il y a une plus forte corrélation entre les rayonnements solaires et la T_{mrt} atténuée.

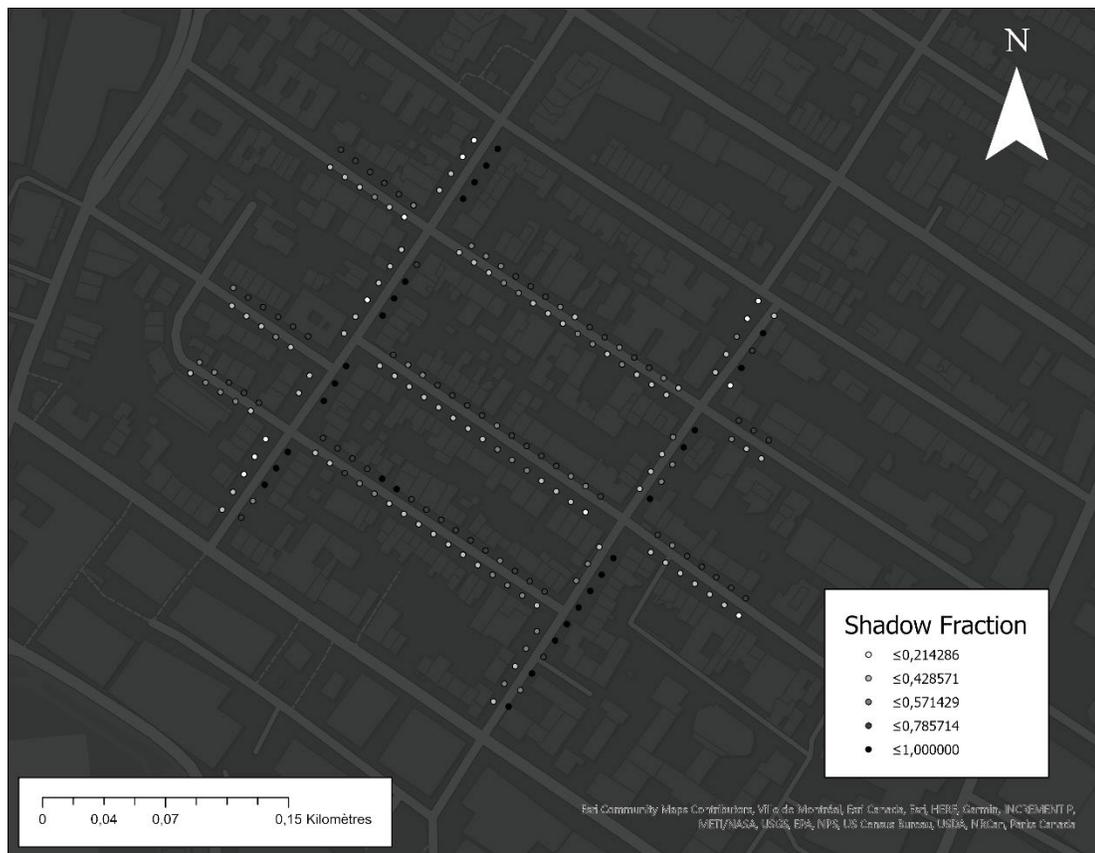


Figure 3.27 Carte du *Shadow Fraction* moyen des heures AM des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal



Figure 3.28 Carte du *Shadow Fraction* moyen des heures PM des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal

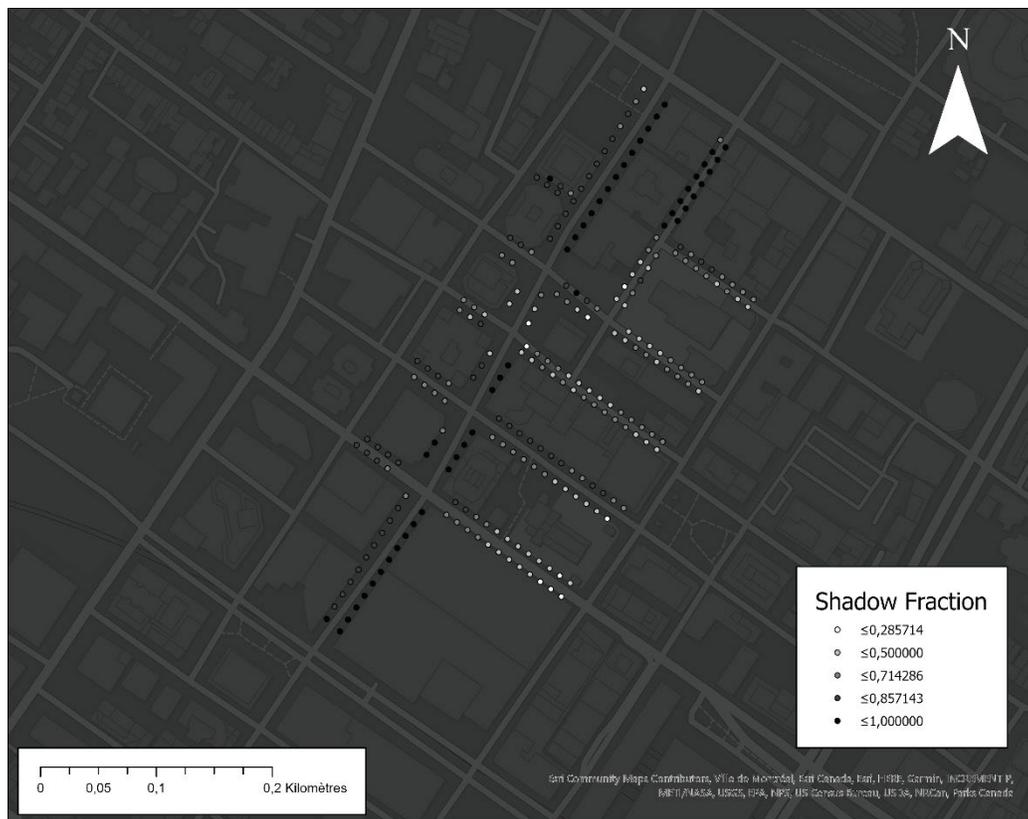


Figure 3.29 Carte du *Shadow Fraction* moyen des heures AM des POIs de la zone de Ville-Marie

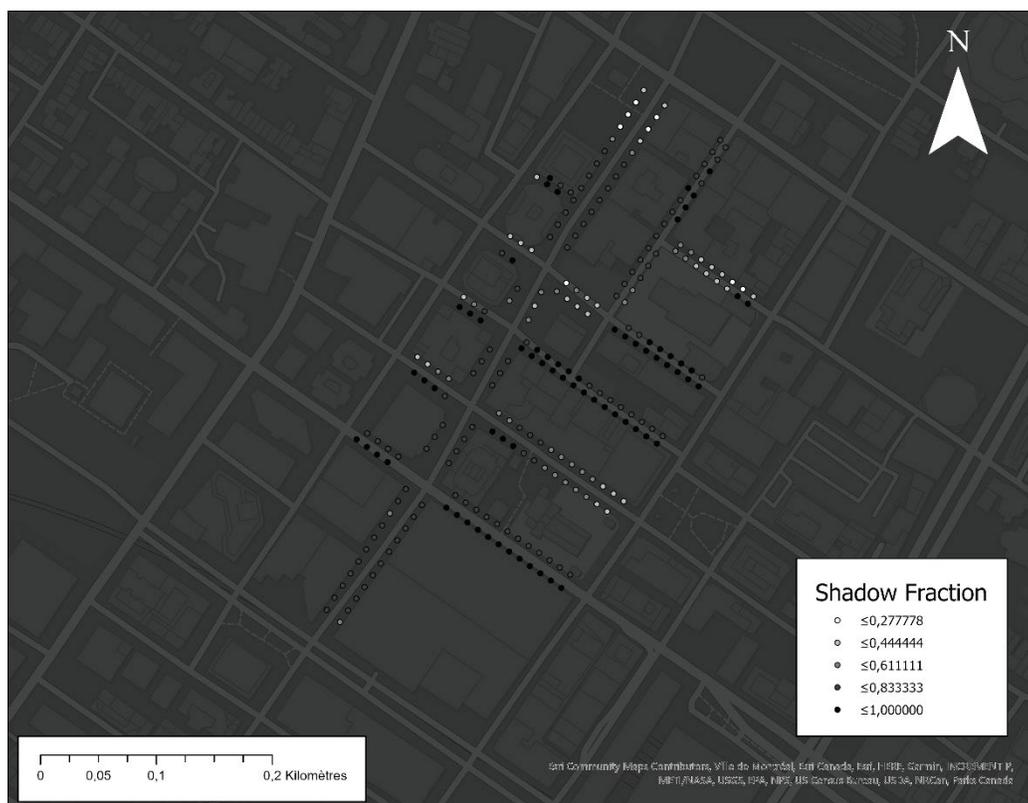


Figure 3.30 Carte du *Shadow Fraction* moyen des heures PM des POIs de la zone de Ville-Marie

Maintenant voyons voir la corrélation entre l'atténuation de T_{mrt} et le *Shadow Fraction*.

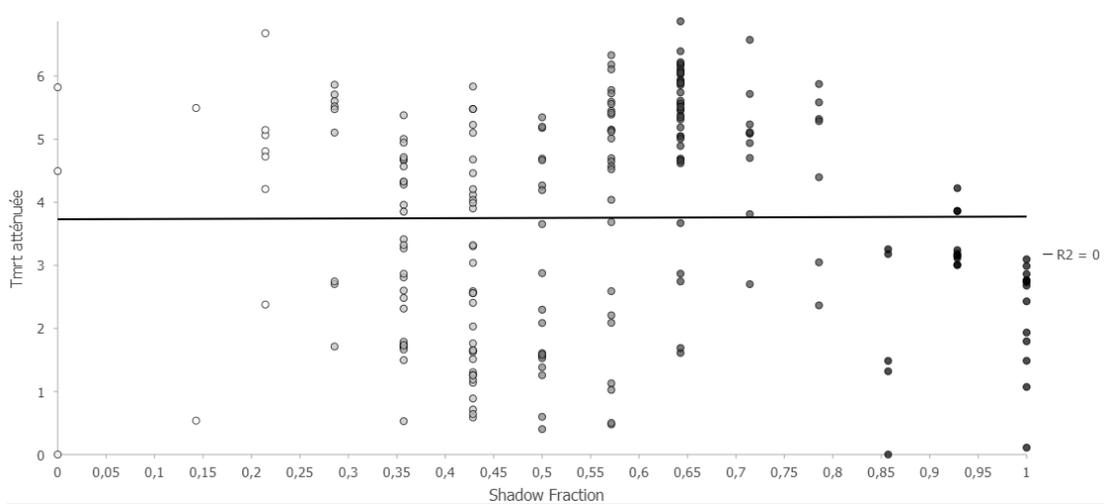


Figure 3.31 Graphique de la relation entre la T_{mrt} quotidienne atténuée et le *Shadow Fraction* moyen des heures AM des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal

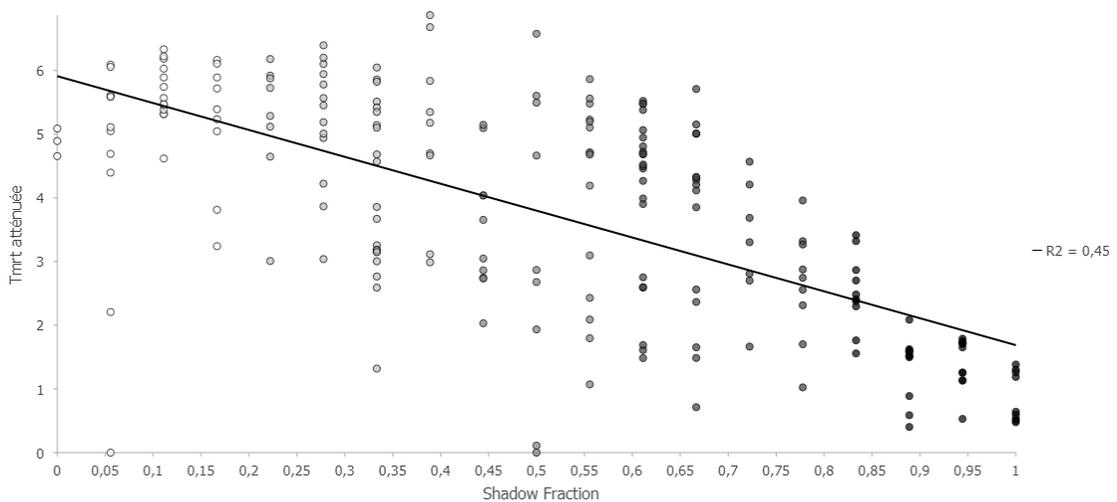


Figure 3.32 Graphique de la relation entre la T_{mrt} moyenne quotidienne atténuée et le *Shadow Fraction* moyen des heures PM des POIs de la zone du Plateau Mont-Royal

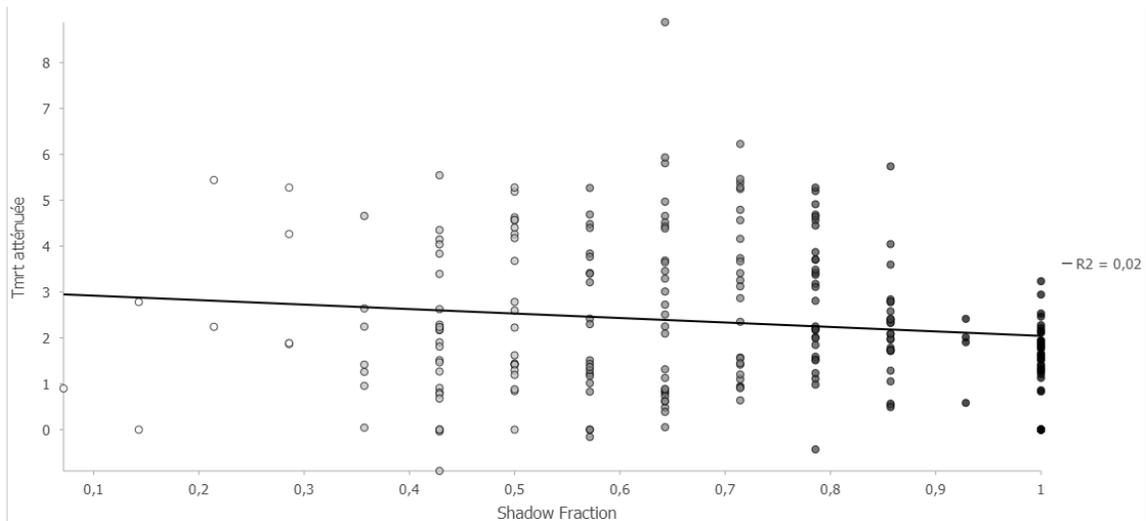


Figure 3.33 Graphique de la relation entre la T_{mrt} moyenne quotidienne atténuée et le *Shadow Fraction* moyen des heures AM des POIs de la zone de Ville-Marie

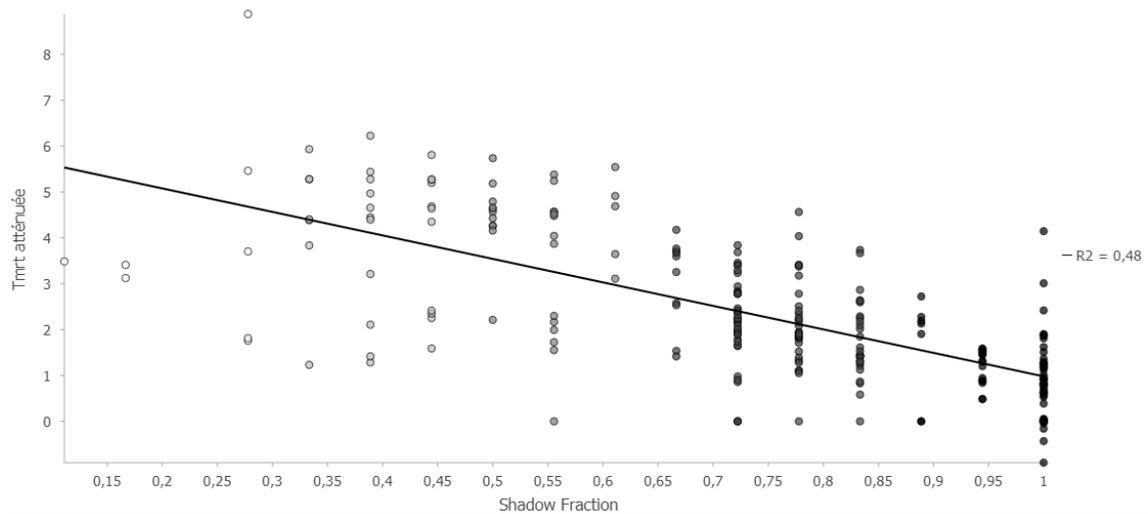


Figure 3.34 Graphique de la relation entre la T_{mrt} moyenne quotidienne atténuée et le *Shadow Fraction* moyen des heures PM des POIs de la zone de Ville-Marie

Ces résultats indiquent par les coefficients de détermination des deux zones une plus forte corrélation entre le *Shadow Fraction* et la diminution de T_{mrt} durant l'après-midi. En effet, dans la zone du Plateau Mont-Royal, il n'y a aucune corrélation entre les deux variables durant les heures AM (Figure 3.31), tandis qu'en PM on observe un R^2 de 0,45 (Figure 3.32). On constate des résultats similaires dans la zone de Ville-Marie, avec un R^2 de 0,02 en AM (Figure 3.33) et un R^2 de 0,48 en PM (Figure 3.34).

CHAPITRE IV : INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

4. 1 Influence de la canopée et du bâti:

4.1.1 Influence de la superficie de canopée :

Nos résultats ont permis de confirmer que la superficie de la canopée influence directement l'atténuation de T_{mrt} . Effectivement, l'atténuation de la T_{mrt} et la superficie de canopée en m^2 sont largement corrélés (coefficient de détermination > 0.9) et ce pour les deux zones d'études (Figures 3.15 et 3.16). Donc, comme le suggèrent de nombreuses études, plus la superficie couverte par les arbres est importante, moins la chaleur s'accumule en surface, diminuant ainsi le stress thermique durant les heures diurnes (Ng *et al.*, 2012 ; Lin *et al.*, 2010 et Srivanit et Hokao, 2013). Donc, dans tout projet d'aménagement d'arbres, il est nécessaire de prioriser le maximum d'arbres afin d'atténuer davantage le stress thermique induit par les ICUs.

4.1.2 Influence du cadre bâti :

Ensuite, la T_{mrt} est en moyenne plus faible dans la zone de Ville-Marie. Cela s'explique par le cadre bâti de cette zone qui se situe dans le centre-ville de Montréal. En effet, les bâtiments sont en moyenne plus élevés que dans la zone du Plateau (77,62 mètres), et donc les bâtiments génèrent plus d'ombrage au sol (Tableau 3.2). Au contraire, cela fait en sorte qu'il y a une moins grande quantité de rayonnement solaire incident dans cette zone, ce qui explique pourquoi il y a une moins forte diminution de T_{mrt} dans la zone de Ville-

Marie que dans celle du Plateau Mont-Royal. En analysant les valeurs du FCV, celles-ci sont plus faibles dans la zone de Ville-Marie, ce qui indique qu'il y a en moyenne un ciel moins visible que dans l'autre zone (Tableau 3.2). Les valeurs du *Shadow Fraction* nous indiquent également qu'il y a une moins forte quantité de rayonnements solaire dans la zone de Ville-Marie, avec des valeurs moyennes de 0,53 comparativement à 0,59 dans la zone du Plateau. Ces résultats sont en concordance avec plusieurs études qui stipulent également que les zones avec un cadre bâti dense et élevé présentent une T_{mrt} plus faible en raison de l'ombrage généré par les bâtiments (Lindberg et Grimmond, 2011).

L'atténuation de la T_{mrt} par les arbres est supérieure dans la zone du Plateau Mont-Royal. Cela s'explique probablement par le fait que cette zone est constituée d'un cadre bâti évasé (bâtiments de 2 ou 3 étages) qui permet l'entrée d'une plus grande quantité de rayonnements solaires incidents. Le score du FCV des zones vient appuyer ce constat, car celui-ci est plus élevé dans le Plateau et indique une plus grande visibilité du ciel (Figure 3.1 et 3.2). Le constat qu'un arbre permet d'atténuer une plus grande quantité de chaleur dans un environnement avec un FCV élevé a été prouvé dans plusieurs autres études (Coutts *et al.*, 2016 ; Tan *et al.*, 2016 ; Thom *et al.*, 2016). Ces études arrivent à la même logique qui stipule que plus il y a de rayonnements solaires, plus il y a un potentiel d'atténuation de chaleur et donc d'effet d'ombrage potentiel via l'aménagement des arbres.

Donc, plus les espaces sont soumis à des rayonnements solaires incidents, plus l'ombrage au sol généré par un arbre permet de diminuer la chaleur. À l'inverse, dans un contexte où le cadre bâti génère beaucoup d'ombres, les arbres ont un moins grand impact sur la T_{mrt} , car le cadre bâti empêche de produire leur propre ombre. Par conséquent, les zones prioritaires ou à

privilégier pour la population d'arbres, sont les endroits où il y a en moyenne des valeurs de FCV plus élevées.

4.1.3 Influence du positionnement des arbres :

Les résultats nous ont démontré que deux côtés de rue atténuent plus la T_{mrt} , soit les côtés Est et Nord. Bien évidemment, le scénario avec l'ensemble des arbres (Nord/Sud/Est/Ouest) à l'atténuation la plus forte.

Par contre, les résultats sont différents avec ceux des POIs. En effet, les arbres de côté Nord sont en première position pour la meilleure atténuation moyenne dans la zone du Plateau Mont-Royal dans l'analyse de POIs (Tableau 3.6). Tandis que ceux-ci sont en 3^e position dans les résultats des cartes de T_{mrt} (Tableau 3.4). Cette différence de résultats entre les types d'analyse n'est pas surprenante considérant leur nature distincte. Donc, les arbres avec une atténuation élevée dans les résultats des POIs, mais une atténuation faible pour les cartes T_{mrt} démontrent que ceux-ci atténuent bien à l'endroit où ils sont situés, mais n'ont pas une grande influence sur la T_{mrt} autour d'eux. À l'inverse du côté Est et Nord, ce sont les arbres placés sur le côté Sud des rues qui ont la plus faible atténuation, et ce pour les deux zones.

Pour ce qui est des résultats d'atténuation de T_{mrt} par m^2 réalisée sur les cartes matricielles, ceux-ci démontrent encore une fois que ce sont les côtés Est et Nord qui sont les plus efficaces à atténuer la T_{mrt} . Ces résultats s'expliquent par l'angle solaire au travers de la journée et la trajectoire du soleil. En effet, il faut considérer le fait que le soleil se lève de l'Est et se couche vers l'Ouest. En matinée, les arbres situés du côté Est des rues reçoivent les rayonnements du soleil situé à l'Est, ce qui fait de l'ombre vers l'ouest, couvrant donc la rue. Au contraire, les arbres situés à l'Ouest lorsqu'ils reçoivent les

rayonnements solaires du matin, génèrent de l'ombre presque seulement que sur les bâtiments, ce qui impact beaucoup moins le bilan radiatif du sol. Le même principe est observable avec les côtés Nord et Sud des routes. En raison de la trajectoire solaire, les arbres situés aux côtés Nord et Est génèrent plus d'ombre au travers de la journée. C'est ce principe qui explique pourquoi ils ont une atténuation de T_{mrt} par m^2 plus élevée. Ce constat est également observable par les résultats des *Shadow Fraction*.

4.1.4 Constats sur le FCV et le *Shadow Fraction* :

Il a été déterminé dans les résultats qu'il existait une forme de corrélation entre le FCV et l'atténuation de la T_{mrt} . En effet, on a remarqué par l'analyse des POIs, que le coefficient de détermination entre le score de FCV et la diminution de T_{mrt} est relativement faible dans les deux zones. Soit un R^2 de 0,11 dans la zone du Plateau Mont-Royal et de 0,13 dans la zone de Ville-Marie (Figure 3.21 et 3.22). Cela veut dire qu'en moyenne lorsque le FCV à l'endroit d'un arbre est plus haut, il devrait y avoir en moyenne une plus haute atténuation de T_{mrt} . Par contre, ces résultats montrent qu'un arbre situé à un endroit avec un FCV élevé ne veut pas nécessairement dire qu'il atténuera plus le stress thermique. Il faut prendre en considération d'autres éléments.

Le *Shadow Fraction* semble être un score qui nous indique plus adéquatement où il serait nécessaire de positionner les arbres dans le cadre bâti. Comme nous l'avons vu, le FCV nous indique où le ciel est le plus à découvert. Par contre, le fait que le ciel soit à découvert ne garantit pas l'incidence de rayonnements solaires, il augmente la probabilité qu'il y en aille. Au contraire, le score du *Shadow Fraction* nous dit précisément le pourcentage d'ombre durant une période donnée. Donc, cela nous indique également l'influence solaire au travers d'une zone. On observe par le coefficient de détermination

que le *Shadow Fraction* est un meilleur prédicteur d'atténuation de T_{mrt} que le FCV. En effet, on voit que le R^2 entre l'atténuation de T_{mrt} et le *Shadow Fraction* est de 0,52 pour le Plateau Mont-Royal et de 0,4 dans le quartier de Ville-Marie (Figure 3.25 et 3.26). Cela est beaucoup plus élevé que le coefficient de détermination entre la T_{mrt} atténuée et le FCV.

Mise à part la superficie de canopée, c'est le *Shadow Fraction* qui semble avoir la plus forte incidence sur l'atténuation de T_{mrt} . Le fait que le coefficient de corrélation entre le *Shadow Fraction* et la diminution de T_{mrt} soit relativement élevé, rejoint le principe que plus il y a d'incidence solaire, plus les arbres ont un grand potentiel d'atténuation. Donc, selon ces résultats, il faut prioriser les endroits où il y a un maximum de rayonnements solaires au travers de la journée, soit des endroits avec un *Shadow Fraction* faible.

De plus, par les résultats des *Shadow Fraction*, nous pouvons également expliquer pourquoi les arbres situés sur les côtés de rue Est et Nord sont plus efficaces à atténuer la chaleur. En effet, le Tableau 3.10 nous montre que ce sont l'Est et le Nord qui ont le score moyen de *Shadow Fraction* le plus faible. Cela signifie que ce sont les endroits où il y a eu le moins d'ombre au travers de la journée. Donc par le fait que ceux-ci reçoivent plus de rayonnement solaire, ceux-ci peuvent générer de l'ombre sur une plus longue période.

Les résultats obtenus permettent de préciser davantage cette priorisation par l'analyse du *Shadow Fraction* durant les heures AM et PM. Le coefficient de corrélation entre le *Shadow Fraction* et l'atténuation de T_{mrt} moyenne quotidienne pour les heures AM et PM ont démontré qu'il y a forte différence entre les heures AM et PM. En effet, le *Shadow Fraction* des heures AM semble avoir peu ou même aucune corrélation avec l'atténuation de T_{mrt} , soit

un R^2 de 0 pour la zone du Plateau Mont-Royal et de 0,02 pour la zone de Ville-Marie (Figure 3.31 et 3.33). Au contraire, les heures PM ont un coefficient de détermination plus fort avec un R^2 de 0,45 dans la zone du Plateau Mont-Royal et de 0,48 dans la zone de Ville-Marie (Figure 3.32 et 3.34). Cela indique qu'il est beaucoup plus probable qu'un arbre atténue la T_{mrt} lorsqu'il reçoit du soleil en après-midi. Le fait que l'atténuation se produit en après-midi est probablement en raison des plus fortes températures lors de cette période de la journée. En regardant les températures enregistrées à la station d'ESCER (Figure 4.1), on remarque que c'est en après-midi que les températures s'avèrent les plus chaudes. Les arbres permettent donc potentiellement de diminuer davantage le stress thermique lorsque ceux-ci reçoivent des rayonnements solaires durant la période la plus chaude de la journée, soit l'après-midi. Nous devons donc ajouter à la liste de priorisation de plantation les endroits qui reçoivent des rayonnements solaires incidents durant les heures de l'après-midi.

En plus d'avoir analysé les arbres selon le côté des axes routiers, nous les avons étudiés selon la direction de l'axe routier. Ce qui a été remarqué est le fait que l'atténuation de T_{mrt} n'avait pas une grande variation en fonction de la direction de l'axe routier. Cette faible différence entre les axes Nord/Sud et Est/Ouest est observable également dans le score de FCV et de *Shadow Fraction*. En particulier le *Shadow Fraction* qui sont pratiquement identique dans le Plateau Mont-Royal, avec une différence de 0,001 et de 0,06 dans la zone de Ville-Marie. Ceci suggère de ne pas prioriser la plantation d'arbres en fonction de la direction de l'axe routier. La direction de l'axe routier sur lequel un arbre se situe a donc une moins grande influence sur la diminution de T_{mrt} que le côté de rue sur lequel il se situe.

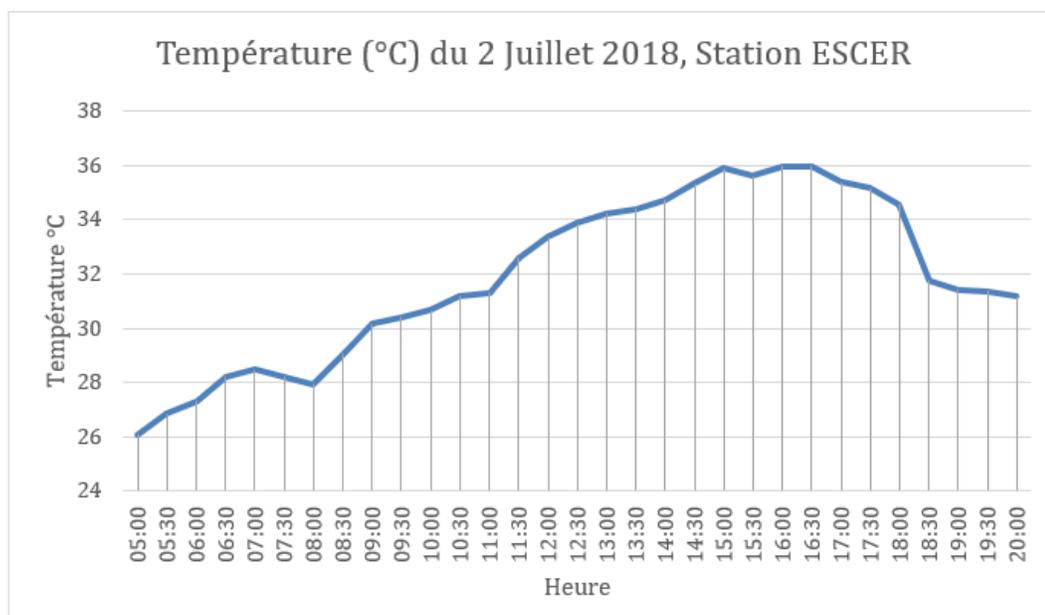


Figure 4.1 Températures enregistrées le 2 juillet 2018 à la station ESCER

4.2 Recommandations quant aux aménagements d'arbre :

Finalement nous pouvons regrouper un ensemble de critères de priorisation lorsque des arbres sont aménagés à des fins d'atténuation du stress thermique lors des heures diurnes :

1. Prioriser la plantation d'un maximum d'arbres.
2. Prioriser la plantation d'arbres dans des zones avec un FCV moyen élevé.
3. Prioriser la plantation d'arbres sur les côtés Nord et Est des axes routiers dans le contexte montréalais.
4. Prioriser la plantation d'arbres à des endroits avec un FCV élevé.
5. Prioriser la plantation d'arbres à des endroits où le score *Shadow Fraction* est faible.

6. Prioriser la plantation d'arbres à des endroits où le score *Shadow Fraction* est faible durant les heures d'après-midi.

4.2.1 Limites de *SOLWEIG* :

Souvent dans les études concernant les ICUs, il est question des différents matériaux composant les zones à l'étude. Dans le contexte de cette étude, étant donné la nature fictive de la canopée, il fut impossible de distinguer l'occupation du sol en dessous de la vraie canopée. Ceci fait en sorte que l'occupation du sol utilisée dans le cadre de la modélisation n'avait que deux classes : bâtiment et pavée. L'albédo des différents types de matériaux a une influence sur la manière dont les rayonnements solaires incidents interagissent avec le cadre bâti. Certes, avoir seulement que deux classes d'occupation du sol nous placent dans un contexte où l'influence du positionnement des arbres peut être davantage isolée. Par contre, dans le cas où il faudrait réaliser des stratégies d'aménagement plus proche de la réalité des zones d'étude, il serait nécessaire de trouver un moyen d'obtenir une occupation du sol plus détaillée.

En plus de la composition matérielle du sol, il n'y a pas moyen de définir le matériel des murs composant les zones d'études. En effet, le modèle *SOLWEIG* permet l'estimation de la fraction des rayonnements solaires incidents de courte longueur d'onde, mais exécute cette estimation avec un albédo fixe. Certes, obtenir la composition matérielle détaillée de chacun des murs composant les zones serait un travail très ardu. Par contre, avoir l'option d'établir le matériel prédominant des murs permettrait d'offrir une modélisation plus proche de la réalité que celle offerte actuellement dans le modèle *SOLWEIG*.

Le cadre temporel de cette étude, qui ne couvre qu'une seule journée, ne permet pas de tirer des conclusions définitives. En effet, étant donné que le modèle utilisé est un modèle radiatif, celui-ci ne permet pas la modélisation lors des heures nocturnes. Certes, les heures diurnes sont celles où la température est en moyenne la plus élevée. Par contre, c'est durant les heures nocturnes que les effets des ICUs sont les plus accentués. Durant la nuit, les surfaces minéralisées dégagent de la chaleur latente qui peut stagner dans les endroits où le phénomène de canyon urbain se produit (Santamouris, 2013).

Un autre facteur qui n'a pas été considéré par le modèle *SOLWEIG* est la deuxième façon dont un arbre diminue le stress thermique, soit l'évapotranspiration. La modélisation réalisée ici ne prend en compte que l'effet d'ombrage, mais pas l'effet ambiant relié à l'évapotranspiration et son influence sur la diminution des températures de surface. On stipule dans les résultats que les arbres atténuent la T_{mrt} plus amplement lorsque ceux-ci reçoivent des rayonnements solaires sur leur canopée. Par contre, on ne considère pas que même si un arbre n'est pas au soleil et ne produit pas d'ombre, celui-ci diminue tout de même l'air ambiant par l'évapotranspiration. En effet, il a été démontré que les arbres peuvent diminuer la température loin de l'ombre qu'ils génèrent (Santamouris, 2015). Cela veut dire qu'un arbre à l'ombre peut tout de même avoir une influence sur le stress thermique. Donc, pour avoir un portrait complet de l'influence des arbres sur le stress thermique, il faudrait, en plus de la modélisation *SOLWEIG*, modéliser l'influence de l'évapotranspiration sur la T_{mrt} .

4.2.2 Validation des résultats du modèle :

Une autre lacune de cette étude est le fait qu'il n'y a pas eu de validation sur le terrain en fonction de la modélisation. La validité de cette modélisation fut

basée sur plusieurs études réalisées sur le modèle *SOLWEIG* et d'autres modèles similaires (Gál et Kántor, 2020). Dans ces études, *SOLWEIG* ressortait comme étant le plus adéquat à l'estimation de la T_{mt} . Par contre, malgré le fait que *SOLWEIG* était le meilleur, les études stipulaient que celui-ci comportait certaines lacunes qui devraient être améliorées. Notamment, on constate que le modèle a de la difficulté à faire une estimation adéquate lorsque le point d'estimation entre et sort de zone ombragée. Donc, l'estimation réalisée dans cette étude est plus précise avec un modèle, mais n'est pas parfaite, et devrait être validée sur le terrain. La validation du modèle pour cette étude provient du fait qu'il y avait simplement un manque de données permettant celle-ci. En effet, étant donné que la modélisation est réalisée toutes les heures de la journée, il n'a pas été possible de faire cette validation sur une base horaire. Pour faire une validation, il aurait été nécessaire de planifier une journée où une nacelle aurait enregistré des données météorologiques sur l'ensemble des heures diurnes, et ce à l'intérieur des zones d'étude. En considérant que le cadre temporel de cette étude est en 2018, cela n'a pas été possible. La validation aurait permis de calculer une marge d'erreur sur le modèle, et d'obtenir des résultats encore plus précis.

4.2.3 Applicabilité :

L'exercice de cette étude avait pour but de mieux comprendre l'influence de l'emplacement d'un arbre sur la T_{mt} en fonction du cadre bâti. Pour ce faire, plusieurs éléments doivent être considérés dans un aménagement réel furent mis de côté pour reproduire cet exercice théorique. Par exemple, les dimensions des arbres ainsi que leur espèce furent uniformisées pour isoler l'influence du positionnement sur le stress thermique. Par contre, dans un contexte réel la variété des arbres est un facteur crucial dans l'aménagement. L'agglomération de plusieurs arbres de la même espèce peut créer des

problèmes d'épidémie pouvant engendrer la mort de multiples arbres (Cappaert *et al.*, 2005). De plus, les endroits auxquels les arbres furent positionnés dans les scénarios d'aménagement fictifs ne représentent pas nécessairement les endroits réels de plantation. Certes, les arbres fictifs furent plantés sur les trottoirs, mais l'espacement entre ceux-ci et leur endroit précis ne respecte pas nécessairement les règles d'aménagement des quartiers. Donc, si nous voulions refaire l'exercice de cette étude avec un but d'aménagement réalisable, il faudrait considérer une panoplie d'espèces d'arbres à modéliser, ainsi que des endroits de plantation fictifs qui considèrent les règles d'aménagement des zones d'étude.

De plus, il faut se rappeler que les résultats obtenus ici nous ont permis d'établir certaines propositions d'aménagement qui sont liées au contexte spécifique des zones d'étude. La priorisation des axes Nord et Est provient du fait que les axes routiers sont enlignés à l'azimut spécifique de Montréal. Donc, dans d'autres secteurs de Montréal, par exemple le quartier Lasalle, il ne faut pas nécessairement prioriser les côtés Nord et Est dans la plantation d'arbres. Les résultats obtenus sont également liés au plan en damier de Montréal, soit en quadrillé. Donc une autre ville avec une planification de ville différente, par exemple certaines villes européennes avec les rues organisées sur un plan radioconcentrique, ne pourrait pas appliquer les acquis retenus ici.

CONCLUSION

Le but de ce mémoire était d'abord de caractériser le tissu urbain de deux zones d'études afin d'ensuite modéliser et analyser comment différents aménagements d'arbres fictifs affectent la température radiante médiane (T_{mrt}). Les 32 scénarios d'aménagements modélisés ont tout de même permis d'isoler certains facteurs clés à considérer dans l'aménagement des arbres notamment :

- Prioriser la plantation d'arbres sur les côtés Nord et Est des axes routiers dans le contexte montréalais.
- Prioriser la plantation d'arbres à des endroits où le score *Shadow Fraction* est bas.
- Prioriser la plantation d'arbres à des endroits où le score *Shadow Fraction* est bas durant les heures d'après-midi.

Les résultats probants obtenus ont permis d'émettre plusieurs recommandations d'aménagement qui ne représentent seulement qu'une partie de la solution afin de diminuer le stress thermique en milieu urbain. La modélisation est un outil très utile afin de mieux comprendre comment combattre ce phénomène. Certains résultats de cette étude peuvent potentiellement guider certaines interventions en matière de plantation d'arbres en ville et favoriser de meilleures pratiques d'aménagement. Cependant, les résultats ne sont pas directement transférables dans d'autres contextes. D'autres périodes d'analyse qui tiennent compte de conditions météorologiques et climatiques différentes devraient être envisagées afin d'adapter ou d'évaluer le modèle de façon systématique et permettre des conclusions plus définitives.

Dans de futurs travaux, il serait pertinent de procéder à l'automatisation des processus clés, et d'inclure une interrelation plus complète entre plusieurs autres variables non considérées dans notre étude. Par exemple, les attributs physiques des arbres seraient à inclure, notamment l'effet sur les flux d'évaporation qui refroidissent la température de surface et de l'air sus-jacent, afin d'évaluer leur impact sur la T_{mrt} . Étant donné les informations et données disponibles pour réaliser notre recherche, un nombre de scénarios d'aménagement fixe ou limité a été envisagé. Toutefois, grâce à l'automatisation, et à un accès à plus de données disponibles sur d'autres périodes de temps, il serait possible de réaliser une modélisation afin de quantifier par exemple l'influence de chacun des arbres pris individuellement. Par ailleurs, l'influence de l'arbre autour de celui-ci n'a pas été analysée dans notre étude et mériterait d'être identifié et évalué dans de futures études. En automatisant notre procédure de modélisation, il serait possible d'obtenir un portrait de l'influence individuelle de chacun des arbres en fonction de leur endroit.

Comme suggéré dans d'autres études, les arbres permettent via leur ombrage et leurs effets sur la modification du bilan énergétique de diminuer la T_{mrt} et donc peuvent contribuer à réduire la température au sein des ICUs lors de périodes de canicules. Via l'application de meilleures pratiques d'aménagement des arbres en ville, il est donc possible de réduire l'excès de chaleur en milieu urbain, en plus d'améliorer la qualité de l'air (Nowak *et al.*, 2014), un aspect qui n'a pas été abordé dans notre étude. Il est clair que la présence des arbres est bénéfique, mais dans un contexte urbain, leur aménagement doit être envisagé en conjonction avec d'autres solutions qu'il convient de mettre en place selon le contexte. C'est pourquoi il est important de continuer à faire progresser nos connaissances sur l'effet des arbres et de la végétation urbaine. Il faut non seulement faire progresser les connaissances

afin de mieux aménager nos villes, mais également démontrer de manière probante les différentes solutions qui permettront de faire de nos milieux de vie urbains des espaces plus résilients face aux changements climatiques en cours et à venir. Grâce à ces recherches, une meilleure symbiose entre l'homme et la nature au sein des agglomérations urbaines serait envisageable dans un contexte où les villes continueront d'accueillir de nouvelles infrastructures et des populations de plus en plus exposées aux canicules alors que le réchauffement du climat s'accélère et prendra une ampleur inégalée au cours des prochaines décennies (IPCC, 2018).

BIBLIOGRAPHIE

Abreu-Habrich, L.V., Labaki, L.C. et Matzarakis, A. (2015) Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics, *Landscape and Urban Planning*, 138, 99-109.

Ali-Toudert, F. et Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon and outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Build, Environ*, 41, 94-108.

Aminipouri, M., Rayner, D., Lindberg, F., Thorsson, J., Knudby, A., Zickfeld, K., Middel, A. et Scott Krayenhoff, E. (2019). Urban tree planting to maintain outdoor thermal comfort under climate change: The case of Vancouver's local climate zones, *Building and Environment*, 158, 226-236.

Arbor Day Foundation (2020) (Page consultée le 15 avril 2020). *Silver Maple Acer saccharum*, [En ligne], (<https://www.arborday.org/trees/treeGuide/TreeDetail.cfm?itemID=869>).

Bulletin d'information en santé environnementale (BISE) (2014). *Étude de performance de projets de lutte aux îlots de chaleur urbains dans la région de Montréal*. Québec, Montréal.

Bulletin d'information en santé environnementale (BISE) (2018). *Surveillance des impacts des vagues de chaleur extrême sur la santé au Québec à l'été 2018*. Québec.

Bush, E. et Lemmen, D.S (2019). *Rapport sur le climat changeant du Canada*, Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 466 p.

Carfan, A-C., Galvani, E. et Nery, J-T. (2012). Study of thermal comfort in the City of São Paulo using ENVI-met model, *Investigaciones Geograficas del Instituto de Geografia, UNAM*, 78, 34-47.

Cantat, O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, *Norois*, 191, 75-102.

Cappaert, D., McCullough, D.G., Poland, T.M. et Siegert, N.W. (2005). Emerald Ash Borer in North America: A Research and Regulatory Challenge, *American Entomologist*, 51, 152-165.

Chebana, F., Martel, B., Gosselin, P., Giroux, JX., et Ouarda, TBMJ. (2013). A general and flexible methodology to define thresholds for heat health watch and warning systems, applied to the province of Quebec (Canada), *International Journal of Biometeorology*, 57(4), 631–644.

Cohen, P., Potchter, O., et Matzarakis, A. (2012). Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. *Building and Environnement*, 51, 285-295.

Coutts, A.M., White C, Emma., Tapper, N.J., Beringer, J. et Livesley, S.J. (2014). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments, *Theoretical and Applied Climatology*, 124, 55-68.

Delclaux, P. (2021). Télédétection : Occupations des sols, *Universalis*, [En ligne]. (<https://www.universalis.fr/encyclopedie/teledetection/4-les-applications-de-la-teledetection/>) Page consultée le 7 janvier 2021.

Dimoudi, A., et Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits, *Energy and Building*, 35, 69-76.

Direction de santé publique centre intégrée de santé et de services sociaux de Laval (CISSS) (2019). *Rapport d'enquête épidémiologique : Vague de chaleur de l'été 2018*, [En ligne]. (http://www.lavalensante.com/fileadmin/internet/cisss_laval/Documentation/S_ante_publicque/Rapports_et_memoires/2019/Rapport_vague_de_chaleur_2018_Laval_final_2019-05-29_2_.pdf).

Données historiques (2020). *MONTREAL/PIERRE ELLIOTT TRUDEAU INTL QUÉBEC*, [En ligne]. Canada : Environnement et ressources naturelles, Station météorologique no. 7025251. (https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html) . Page consultée le 8 octobre 2020.

Dumont, G. (2016). Vieillesse de la population et géopolitique, *Politique Étrangère*, 2, 157-170.

Fischer, L. (2005). Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg, *Revenu Géographique de l'Est*, 45 / 2, 99-112.

Gál, C. et Kántor, N. (2020). Modeling mean radiant temperature in outdoor space, A comparative numerical simulation and validation study, *Urban Climate*, 32.

Gachon, P., Bussières, L., Gosselin, P., Raphoz, M., Bustinza, R., Martin, P., Dueymes, G., Gosselin, D., Labrecque, S., Jeffers, S., et Yagouti, A. (2016) *Guide pour l'identification des seuils d'alertes aux canicules au Canada bas es sur les données probantes. Co edit e par l'Université du Québec à Montréal, Environnement et Changement climatique Canada, l'Institut National de Santé Publique du Québec, et Santé Canada, Montréal, Québec, Canada, 75 p.*

G eindex, *Orthographe couleur de la Communauté métropolitaine de Montréal - 2013 (12 cm).* (2014), [En ligne], (http://geindex.uqam.ca/#meta_infoSup). Page consultée le 1 novembre 2020.

Girard-Bossé, A et Ouelette-Vézina, H. (2021). Vague de Chaleur dans l'Ouest : « C'est vraiment insoutenable », *La Presse Actualité*, juin m [En ligne]. (<https://www.lapresse.ca/actualites/2021-06-30/vague-de-chaaleur-dans-l-ouest/c-est-vraiment-insoutenable.php>). Page consultée le 16 Juillet 2021.

Hamdi, R. et Schayes, G. (2008). Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics, *International journal of climatology*, 28, 973-982.

Höppe, P. (1992). A new procedure to determine the mean radiant temperature outdoors, *Wetter Leben*, 44, 147-151.

Huttner, S. (2012). *Further Development and Application of the 3D Microclimate Simulation ENVI-met (Doctoral Dissertation)*, Johannes Gutenberg University, Mainz, Germany.

International Panel On Climate Change (IPCC) (2018). *Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. P ean, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (dir.).

Jungmin, L. et Skimore, M. (2020). Heat Vulnerability and Heat Island Mitigation in the United States, *Atmosphere*, 11, 558.

Kleporer, L., Esch, M. et Salceo, T.B. (2012). How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect, *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30-38.

Leboeuf, A., Beaudoin, A., Fournier, R.A., Guindon, L., Luther, J.E. et Lambert, M.-C. (2007). A shadow fraction method for mapping biomass of northern boreal black spruce forests using Quickbird imagery, *Remote Sensing of Environment*, 110, 488-500.

Lee, H., Mayer, H et Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany, *Landscape and Urban Planning*, 148, 37-50.

Le Petit Robert de la langue Française (2019). Paris : Éditions Le Robert, p.343.

Lin, T-P., Matzarakis, A et Hwang, R-L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort, *Building Environment*, 45, 213-221.

Lindberg, F., Holmer, B. et Thorsson, S. (2008). SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings, *International Journal of Biometeorology*, 52, 697-713.

Lindberg, F. et Grimmond, C.S.B. (2011). *Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city : Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London*, *Urban Ecosystems*, 14, 617-634.

Lindberg, F., Grimmond, S., Onomura, S et Järvi, L. (2015). *UMEP – An integrated tool for urban climatology and climate sensitive planning: Actes du 9e colloque International conference on Urban Climat jointly with the 12th Symposium on the Urban Environment* (Göteborg, 15 Juin 2015). Göteborg.

Lobaccaro, G. et Acero, J.A. (2015). Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons, *Urban Climate*, 14, 251-267.

Local Action for Biodiversity (LAB) (2013). *Ville de Montréal : Rapport sur la biodiversité 2013*. Québec, Ville de Montréal.

Martin, P., Baudouin, Y., et Gachon, P. (2015). An alternative method to characterize the surface urban heat island, *International Journal of Biometeorology*, 59(7), p.849-861.

Matzarakis, A., Rutz. et Mayer, H. (2011). Modeling radiation fluxes in simple and complex environments : basics of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology*, 52(2), 131-139.

Mayhew, S. (2009). Model, S. Mayhew (dir.) *Oxford dictionary of geography*, Oxford : Oxford university Press, p.328.

Middel, Ariane., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M et Roth, M. (2018). Sky View Factor footprints for urban climate modeling, *Urban Climate*, 25, 120-134.

Mohajerani, A., Bakaric, J. et Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete, *Journal of Environmental Management*, 197, 522-538.

Montréal. Portail de données ouvertes (2018). *Modèle numérique de canopée (MNC)*, [En ligne], (<http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/modele-numerique-de-canopee-mnc>). Page consultée le 12 novembre 2020.

Montréal. Portail de données ouvertes (2018). *Actifs de Voiries*, [En ligne], (<https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/voirie-actif>). Page consultée le 13 novembre 2020.

Montréal. Portail de données ouvertes (2016). *Bâtiments*, [En ligne], (<https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/batiment-2d>). Page consultée le 13 novembre 2020.

Ng, E., Chen, L., Wang, Y et Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong, *Building and Environment*, 47, 256-271.

Norton, B., M.Coutts, A., J.Livesley, S., J.Harris, R., M.Hunter, A. et S.G.Williams, N. (2015). Planning for cooler cities : A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes, *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138.

Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A et Greenfield, E. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States, *Environmental Pollution*, 193, 119-129.

Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 108, 1-24.

Ozkeresteci, I., Crewe, K., Brazel., A.J. et Bruse, M. (2003). *Use and evaluation of the ENVI-met model for environmental design and planning: an experiment on linear parks : Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC)* (Surban, 10-16 Août 2003). Afrique du Sud : International Cartographic Association (ICA).

Pomerantz, M., Akbari, H., Chang., Levinson, R et Pon, B. (2003). Examples of Cooler Reflective Streets for Urban Heat-Island Mitigation : Portland Cement Concrete and Chip Seals, *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 49283.

Québec. Institut de la statistique du Québec (ISQ) (2019). *Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2016-2066*, Québec, Ville de Québec.

Québec, Institut de la statistique du Québec (ISQ) (2020). *Le bilan démographique : Édition 2020*, Québec, Ville de Québec.

Québec. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) (2020). *Faits saillant : juillet 2020 : le mois le plus chaud en au moins 100 ans au Québec, la sécheresse se poursuit*, [En ligne], Québec. Page consultée le 2 novembre 2020.

Québec. Santé et environnement (2020). *Prévenir les effets de la chaleur*, [En ligne], (<https://www.quebec.ca/sante/conseils-et-prevention/sante-et-environnement/prevenir-les-effets-de-la-chaleur-accablante-et-extreme/>). Page consultée le 10 novembre 2020.

Québec. Données Québec (2015) (Page consultée le 23 mars 2020). *Modèle numérique de surface (MNS)*, [En ligne], (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/vmtl-modele-numerique-de-surface-mns>)

Québec. Ministère d'énergie et ressources naturelles (MERN) (2020). *Courbes de niveau : Couche hypsométrique à l'échelle de 1/20 000*, [En ligne], (<https://mern.gouv.qc.ca/repertoire-geographique/modeles-numeriques-terrain-hydro-coherents-echelle-regionale/>). Page consultée le 1 octobre 2020.

Québec. Santé et environnement (2020). *Prévenir les effets de la chaleur*, [En ligne], (<https://www.quebec.ca/sante/conseils-et-prevention/sante-et-environnement/prevenir-les-effets-de-la-chaleur-accablante-et-extreme/>). Page consultée le 20 octobre 2020.

Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island-A review of the actual developments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.

Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities-Status, impacts and mitigation challenges, *Energy and Buildings*, 91, 43-56.

Schmerber, J. (2010). cityspace [n], in Evert, K et al (dir.) *Encyclopedic Dictionary of Landscape and Urban Planning*, Berlin, Heidelberg, 779.

Shasha-Bar, L., Pearlmutter, David. et Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment, *International Journal of Climatology*, 31, 1498-1506.

Spangenberg, J., Shinzato, P., Johansson, E et Duarte, D. (2008). Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of Sao Paulo, *Piracicaba*, 2, 1-19.

Spronken-Smith, R.A. et Oke, T.R. (1999). Scale modelling of nocturnal cooling in urban parks, *Boundary-Layer Meteorology*, 93(2), 287-312.

Station Escer UQAM (2020) (Page consultée le 6 novembre 2020). *Température et humidité transmetteur HMD60Y*, [En ligne]. (<http://station.escer.uqam.ca/instrumentation/temperature-humidite>). Page consultée le 4 octobre 2020

Station Escer UQAM (2020) (Page consultée le 6 novembre 2020). *Radiomètres net CNR1*, [En ligne]. (<http://station.escer.uqam.ca/instrumentation/radiometres>). Page consultée le 4 octobre 2020

Station Escer UQAM (2020) (Page consultée le 6 novembre 2020). *Pluviomètre Geonor T-200 B*, [En ligne]. (<http://station.escer.uqam.ca/instrumentation/pluviometre>). Page consultée le 4 octobre 2020

Station Escer UQAM (2020) (Page consultée le 6 novembre 2020). *Anémomètre ultrasonique WS425*, [En ligne]. (<http://station.escer.uqam.ca/instrumentation/anemometre-ultrasonique>). Page consultée le 4 octobre 2020

Statistique Canada (2016). *Profil de recensement, 2016*, Document de recherche, [En ligne]. Québec, no de Catalogue 98-401-X2016044. (<https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>). Page consultée le 12 novembre 2020.

Stewart, I.D., et T. R. Oke. (2012) Local Climate Zones for Urban Temperatures Studies. *American Meteorological Society*, 1879-1900.

Streiling, S. et Matzarakis, A. (2003). Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: A case study, *Journal of Arboriculture*, 29, 309-316.

Srivanit, M. et Hokao, K. (2013). Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer, *Building and Environment*, 66, 158-172.

Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Guixiang, S., ... Chen, H. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai, *International Journal of Biometeorology*, 54, 75-84.

The Nature Conservancy (2016). *Planting Healthy Air : A global analysis of the role of urban in addressing particulate matter pollution and extreme heat*.

Theeuwes, N.E., Steeneveld, G.J., Ronda, R.J., Heusinkveld, B.G., Van Hove, L.W.A. et Holtslag, A.A.M. (2014). Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140, 2197-2210.

Thom, J.K., Coutts, A.M., Broadbent, A.M. et Tapper, N.J. (2016). The influence of increasing tree cover on mean radiant temperature across a mixed development suburb in Adelaide, Australia, *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 233-242.

Thorsson, S., Rocklöv, J., Konarska, J., Lindberg, F., Holmer, B., Dousset, B et Rayner, D. (2014). Mean radiant temperature - A predictor of heat related mortality. *Urban climate*, 10, 332-345.

U.S. Department of Agriculture, Forest Service (1990) (Page consultée le 2 novembre 2020). *Silvics of North America : Volumes 2 : Hardwoods*, [En ligne].

(https://srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/acer/saccharinum.htm),

Page consultée le 10 octobre 2020.

Québec. Ville de Montréal (2020). *Plan Climat 2020-2030*. Québec : Ville de Montréal.

Wang, Y. et Akbari, H. (2016). The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal, *Sustainable Cities and Society*, 27, 122-128.

Watts, N., Adger, W.N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., Chaytor, S., ... Costello, A. (2015). Health and climate change: policy responses to protect public health, *The Lancet Commission*, 386, 1861-1914.

Walter, I.A., Allen, G., Elliot, R., Jensen, M.E., Itenfisu, D., Mecham, B., Howell, T.A., Snyder, R., Brown, P., Echings, S., Spofford, T., Hattendorf, M., Cuenca, R.H., Wright, J.L et Martin, D. (2001). Asce's standardized reference evapotranspiration equation, *Final Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration*, 10.209-216.

Yang, S-R et Lin, T-P. (2016). An integrated outdoor spaces design procedure to relieve heat stress in hot and humid regions, *Building and Environment*, 99, 149-160.f