

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

SERVICES ÉCOLOGIQUES ET IDENTIFICATION DE ZONES DE PLANTATION PRIORITAIRES
D'ARBRES DE RUE À MONTRÉAL : INTÉGRATION DES CRITÈRES SOCIOÉCONOMIQUES ET DES
ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

ECOSYSTEM SERVICES AND IDENTIFICATION OF PRIORITARY PLANTING ZONES FOR STREET
TREES IN MONTRÉAL: INTEGRATION OF SOCIOECONOMIC CRITERIAS AND ENVIRONMENTAL
ISSUES

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉTUDES URBAINES

PAR

RACHEL PILON

OCTOBRE 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). 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

À mes parents pour la transmission de leurs valeurs et de leurs passions.

À mon entourage pour leurs encouragements.

À ma directrice de recherche, Thi-Thanh-Hiên Pham, pour avoir cru en moi.

À mon codirecteur de recherche, Philippe Apparicio, pour m'avoir accueillie dans son laboratoire.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES.....	XIII
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	XVII
RÉSUMÉ	XIX
ABSTRACT	XXI
INTRODUCTION	1
1. CHAPITRE I PROBLÉMATIQUE.....	5
1.1. INTRODUCTION.....	5
1.2. ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DU MILIEU URBAIN	5
1.3. RÔLE DE L'ARBRE EN VILLE.....	9
1.4. INIQUITÉ DANS L'ACCÈS AUX ARBRES ET À LEURS BÉNÉFICES EN VILLE	13
1.5. CANOPÉE ET BESOINS EN GESTION ENVIRONNEMENTALE À MONTRÉAL	15
1.6. QUESTIONS DE RECHERCHE ET ZONE À L'ÉTUDE.....	19
1.7. PERTINENCE ET APPORTS DE L'ÉTUDE.....	21
1.8. CONCLUSION	23

2.	CHAPITRE II CADRE CONCEPTUEL	25
2.1.	INTRODUCTION.....	25
2.2.	SERVICES ÉCOLOGIQUES DES ARBRES URBAINS	27
2.3.	JUSTICE ENVIRONNEMENTALE, ÉQUITÉ ENVIRONNEMENTALE ET ÉQUITÉ COMPENSATOIRE	37
2.4.	CONCEPTUALISER LA PLANIFICATION DE LA PLANTATION D'ARBRES SELON LES BESOINS ET LA CANOPÉE EXISTANTE	42
2.5.	CONCLUSION	48
3.	CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE	49
3.1.	INTRODUCTION.....	49
3.2.	UNITÉS D'ANALYSE DE L'ÉTUDE	50
3.3.	DONNÉES UTILISÉES	50
3.4.	CALCUL DES INDICATEURS DES SE, MESURES D'ÉQUITÉ ENVIRONNEMENTALE ET CONSTRUCTION DES INDICES COMPOSITES	56
3.5.	CONCLUSION	62
4.	CHAPITRE IV : QUANTITÉ ET VARIATION SPATIALE DES SERVICES ÉCOLOGIQUES.....	65
4.1.	INTRODUCTION.....	65
4.2.	CANOPÉE ESTIMÉE.....	65
4.3.	RÉDUCTION DE L'INDEX D'UV MOYEN ET DANS L'OMBRE DES ARBRES.....	70
4.4.	POTENTIEL D'ÉVAPOTRANSPIRATION ET RÉDUCTION DU RUISSELLEMENT	74
4.5.	RETRAIT DU CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ ET DES PM _{2,5}	78
4.6.	SÉQUESTRATION ET DÉPÔT DU CARBONE	82
4.7.	PRODUCTIONS D'OXYGÈNE ET DE COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS.....	85

4.8.	ENSEMBLE DES SE DANS LE TERRITOIRE D'ÉTUDE ET COMPARAISON AVEC CEUX D'UNE AUTRE ÉTUDE.	90
4.9.	CORRÉLATION ENTRE LES DIFFÉRENTS SERVICES ÉCOLOGIQUES	92
4.10.	INDICE COMPOSITE N° 1 : L'ENSEMBLE DES SE	95
4.11.	CONCLUSION	97
5.	CHAPITRE V : DISPARITÉS, BESOINS ET PRIORITÉS DE PLANTATION	99
5.1.	INTRODUCTION.....	99
5.2.	CORRÉLATION ENTRE LES SERVICES ÉCOLOGIQUES ET LES POPULATIONS VULNÉRABLES : DIAGNOSTIC D'ÉQUITÉ ENVIRONNEMENTALE	99
5.3.	IDENTIFICATION DES QUARTIERS EN BESOINS	102
5.4.	INDICE COMPOSITE N° 2 : BESOINS EN TERMES SOCIOÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX	111
5.5.	INDICE COMPOSITE N° 3 : PRIORITÉS DE PLANTATION.....	114
5.6.	CONCLUSION	118
6.	CHAPITRE VI : DISCUSSION ET CONCLUSION.....	119
6.1.	INTRODUCTION.....	119
6.1.	PRINCIPAUX RÉSULTATS	119
6.2.	LIMITES RELATIVES AU CALCUL DES SE	120
6.3.	PISTES D'AMÉLIORATION DES INDICES COMPOSITES	123
6.4.	RECOMMANDATIONS.....	124
7.	ANNEXE A : BASE DE DONNÉES ET UTILISATION D'I-TREE ECO	125
7.1.	DONNÉES DES ARBRES PUBLICS DE LA VILLE DE MONTRÉAL	125
7.2.	UTILISATION DU LOGICIEL I-TREE ECO VERSION 6 POUR CALCULER LES SERVICES ÉCOLOGIQUES	127
8.	ANNEXE B : COMPLÉMENT SUR LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX UTILISÉS COMME INDICATEURS DES BESOINS ENVIRONNEMENTAUX	131

9.	APPENDICE A : LES BÉNÉFICES TIRÉS DES ÉCOSYSTÈMES ET LEURS LIENS AVEC LE BIEN-ÊTRE DE L'HOMME	135
10.	APPENDICE B : EXEMPLES D'IRRÉGULARITÉS D'UN ARBRE DANS LA MESURE DE SON DHP	137
11.	BIBLIOGRAPHIE.....	139

LISTE DES FIGURES

FIGURE	PAGE
1.1 LIMITES GÉOGRAPHIQUES DU TERRITOIRE D'ÉTUDE	21
2.1 SCHÉMA SYNTHÉTIQUE DE LA MÉTHODOLOGIE	26
2.2 SCHÉMA DES SERVICES ÉCOLOGIQUES RETENUS	36
3.1 SCHÉMA RÉSUMANT LA MÉTHODOLOGIE.....	49
3.2 SCHÉMA DES VARIABLES COMPOSANT L'INDICE COMPOSITE N° 2.....	61
3.3 SCHÉMA DE LA MÉTHODE ET DES VARIABLES COMPOSANT L'INDICE COMPOSITE N° 3	62
4.1 DISTRIBUTION DE LA CANOPÉE DES ARBRES DE RUE	69
4.2 DISTRIBUTION DE LA RÉDUCTION DE L'INDEX DE RAYONS ULTRAVIOLETS (UV) PAR LES ARBRES DE RUE	73
4.3 DISTRIBUTIONS DU POTENTIEL D'ÉVAPOTRANSPIRATION ET DE LA RÉDUCTION DU RUISSELLEMENT DES/PAR LES ARBRES DE RUE PAR SECTEUR DE RECENSEMENT	77
4.4 DISTRIBUTION DU RETRAIT DU CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ ET DES PM _{2,5} PAR LES ARBRES DE RUE	81
4.5 DISTRIBUTIONS DE LA SÉQUESTRATION ET DU DÉPÔT DU CARBONE (C) PAR LES ARBRES DE RUE	84
4.6 DISTRIBUTIONS DES PRODUCTIONS D'OXYGÈNE (O ₂) ET DE COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS (COVS) DES ARBRES DE RUE.....	89
4.7 DISTRIBUTION DE L'INDICE COMPOSITE N° 1 (SE) : 9 SERVICES ÉCOLOGIQUES À POIDS ÉGAL....	96
5.1 DISTRIBUTION DES POPULATIONS VULNÉRABLES	104
5.2 DISTRIBUTION DES SECTEURS DE RECENSEMENT ACCUEILLANT UN OUVRAGE DE SURVERSE ET AYANT UNE FAIBLE RÉDUCTION DU RUISSELLEMENT PAR LES ARBRES DE RUE	106
5.3 DISTRIBUTION DES ÎLOTS DE CHALEUR PAR SECTEUR DE RECENSEMENT.....	108

5.4	DISTRIBUTION DES DEUX NUISANCES ENVIRONNEMENTALES : PRÉSENCES D'AUTOROUTES OU D'ARTÈRES (2013) ET DE TERRAINS INDUSTRIELS (2012).....	110
5.5	DISTRIBUTION DE L'INDICE COMPOSITE N° 2 : BESOINS SOCIOÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX	113
5.6	DISTRIBUTION DE L'INDICE COMPOSITE N° 3 : PRIORITÉ DE PLANTATION SELON LES QUINTILES DE 9 SERVICES ÉCOLOGIQUES ET DE 6 FACTEURS DE BESOINS.....	116
7.1	INTERFACE DU LOGICIEL <i>I-TREE ECO VERSION 6</i>	130
7.2	AVANTAGE D'AJOUTER LES COUCHES D'INFORMATION « USAGE DU SOL » (GAUCHE) ET « COÛTS ANNUELS » (DROITE)	130
8.1	DISTRIBUTION DES ÎLOTS DE CHALEUR (2011) (A) PUIS DES SECTEURS DE RECENSEMENT ACCUEILLANT UN ÎLOT DE CHALEUR ET AYANT UNE FAIBLE RÉDUCTION DE L'INDEX DE RAYONS ULTRAVIOLETS (UV) PAR LES ARBRES DE RUE (B)	132
8.2	DISTRIBUTION DES AUTOROUTES, DES ARTÈRES (2013) ET DES INDUSTRIES (2012) (A) PUIS DES SECTEURS DE RECENSEMENT ACCUEILLANT CES DEUX NUISANCES ENVIRONNEMENTALES ET AYANT UN FAIBLE RETRAIT DU CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ ET DES PM _{2,5} PAR LES ARBRES DE RUE (B)	133
9.1	<i>APPENDICE A : CAPTURE DE MEA, 2003, P. 11 (P. 3)</i>	135
11.1	<i>APPENDICE B PARTIE 1 : CAPTURE D'I-TREE, 2017A, P. 36</i>	137
11.2	<i>APPENDICE B PARTIE 2 : CAPTURE D'I-TREE, 2017A, P. 37</i>	138

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	PAGE
3.1 TRANSFORMATION DES CATÉGORIES D'UTILISATION DU SOL DE LA VILLE DE MONTRÉAL POUR LES CONFORMER À CELLES DU LOGICIEL <i>I-TREE ECO VERSION 6</i>	52
4.1 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE L'ESTIMATION DE LA CANOPÉE (%) PAR SECTEUR DE RECENSEMENT, DANS LES ARRONDISSEMENTS ET DANS L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE	67
4.2 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA RÉDUCTION DES UV DANS L'OMBRE DES ARBRES (%) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT	70
4.3 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA RÉDUCTION MOYENNE DES UV SUR LE TERRITOIRE (<i>UVMOYEN</i>) (%) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT	71
4.4 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE L'ESTIMATION DU POTENTIEL D'ÉVAPOTRANSPIRATION (<i>POTÉVAPOTR</i>) (M ³ D'EAU/AN/HA) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT	75
4.5 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA RÉDUCTION DU RUISSELLEMENT (<i>RÉDUCTRUISS</i>) (M ³ D'EAU/ AN/HA) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT.....	76
4.6 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU RETRAIT DE CINQ POLLUANTS (<i>RETR5POLL</i>) (KG/AN/HA) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT	79
4.7 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA SÉQUESTRATION DU CARBONE (<i>SÉQC</i>) (KG/AN/HA) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT	82
4.8 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU DÉPÔT DU CARBONE (<i>DÉPÔTC</i>) (KG/AN/HA) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT.....	83
4.9 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA PRODUCTION D'OXYGÈNE (<i>PRODO₂</i>) (KG/AN/HA) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT	86

4.10 STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA PRODUCTION DE COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS (<i>PRODCOVS</i>) (KG/AN/HA) OBTENUES POUR LES SECTEURS DE RECENSEMENT, PAR ARRONDISSEMENT	87
4.11 ESTIMATION DES SERVICES ÉCOLOGIQUES POUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE D'ÉTUDE.....	91
4.12 COMPARAISON ENTRE LES RÉSULTATS DE LA PRÉSENTE ÉTUDE ET CEUX DE NOWAK <i>ET AL.</i> (2018).....	92
4.13 CORRÉLATIONS ENTRE LES DIFFÉRENTS SERVICES ÉCOLOGIQUES.....	93
5.1 CORRÉLATIONS ENTRE LES SERVICES ÉCOLOGIQUES ET LA PART DES POPULATIONS VULNÉRABLES	100
5.2 NOMBRE ET POURCENTAGE DE SECTEURS DE RECENSEMENT PAR CLASSE DE L'INDICE COMPOSITE N° 3 PAR ARRONDISSEMENT	115

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACP	Analyse en composantes principales
<i>ACP_{VulnSoEc}</i>	Premier axe de l'analyse en composantes principales des pourcentages de personnes ayant déclaré appartenir aux minorités visibles et de celles dans les ménages à faible revenu selon la mesure de faible revenu
AQBAT	<i>Air Quality Benefits Assessment Tool</i>
CBD	<i>Central business district</i> (centre-ville des affaires)
COVs	Composés organiques volatils (dont le pollen)
<i>DépôtC</i>	Dépôt du carbone (kg/ha)
DGPV	Direction des grands parcs et du verdissement
DHP	Diamètre (de l'arbre) à la hauteur de la poitrine, soit à 1,37 m (4,5 pieds) du sol
FPS	Facteur de protection solaire
FPU	Facteur de protection contre les rayons ultraviolets
GISP	Green Infrastructure Spatial Planning
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
IUV	Index des rayons ultraviolets
MAMOT	Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire du Québec
MAMROT	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec

MDDELCC	Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques
MEA	<i>Millennium ecosystem assessment</i>
MFR	Ménage sous la mesure de faible revenu
NAPS	<i>National Air Pollution Surveillance</i>
NCDC	<i>National Climatic Data Center</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OBNL	Organisme(s) à but non lucratif
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> (Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE))
OMS	Organisation mondiale de la santé
$P_{Aînés}$	Pourcentage d'aînés (échelle de 0 à 1)
$P_{Enfants}$	Pourcentage d'enfants (échelle de 0 à 1)
$PotÉvapotr$	Potentiel d'évapotranspiration (m^3 d'eau/an/ha)
$ProdCOVs$	Production de composés organiques volatils totale (mise en négatif, kg/an/ha)
$ProdO_2$	Production d'oxygène (kg/an/ha)
$RéductRuiss$	Réduction du ruissellement (m^3 d'eau/an/ha)
$Retrait5Poll$	Retrait du CO, du NO ₂ , de l'O ₃ , des PM _{2,5} et du SO ₂ (kg/an/ha)
SAR	<i>Spatial autoregressive model</i>
SE	Service(s) écologique(s)/écosystémique(s)
$SéqC$	Séquestration du carbone (kg/an/ha)
SFR	Ménage sous le seuil de faible revenu

SIG	Système d'information géographique
SOVERDI	Société de verdissement du Montréal métropolitain
SQP	Société québécoise de phytotechnologie
STM	Société de transport de Montréal
UFORE	<i>Urban FORest Effects</i>
USFS	<i>United States Forest Service</i>
UV	Rayons ultraviolets
<i>UVMoyen</i>	Réduction moyenne des UV sur le territoire (%)
<i>UVOmbre</i>	Réduction des UV dans l'ombre des arbres (%)

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

C	Carbone
CO	Monoxyde de carbone
ha	Hectare
kg	Kilogramme
m	Mètre
m ²	Mètre carré
m ³	Mètre cube
NO ₂	Dioxyde d'azote
NO _x	Oxyde d'azote
O ₃	Ozone
PM _{2,5}	Particules fines (d'origines anthropiques) dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 2,5 µm
ppb	Partie par milliard
ppm	Partie par million
SO ₂	Dioxyde de soufre
µm	Micromètre

RÉSUMÉ

Les villes font face à plusieurs enjeux environnementaux qui affectent les écosystèmes comme les îlots de chaleur, les divers types de pollutions, les changements climatiques et la gestion de l'eau. Ces problèmes affligent, à leur tour, la santé publique. Nous savons que les arbres urbains peuvent jouer un grand rôle dans la mitigation de ces problèmes, grâce à leurs services écologiques (SE). Ainsi, leur distribution à l'échelle de la ville pose un enjeu d'équité environnementale dans l'accès à ses bénéfices. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux SE des arbres de rue de Montréal. Les objectifs de cette recherche sont les suivants :

1. Quelles sont les quantités de services écologiques produits par les arbres de rue à Montréal – en termes d'eau filtrée, d'air dépollué, d'oxygène produit, de rayons ultraviolets (UV) interceptés, de canopée – et quelles sont leurs variations spatiales à travers cette ville ?
2. Concernant l'équité environnementale, parmi les quatre groupes de population retenus (les enfants (<15 ans), les aînés (65 ans et plus), les ménages à faible revenu et les minorités visibles), certains ont-ils un accès nettement plus limité aux SE fournis par les arbres de rue ?
3. Quelle serait l'utilité d'un indice composite propre à chaque arrondissement dans la planification de leurs interventions en regard de leurs besoins spécifiques qui sont déterminés par leurs conditions géographiques et naturelles ainsi que par leur profil démographique et socioéconomique ?

La zone d'étude couvre 15 des 19 arrondissements de la Ville de Montréal choisis selon la disponibilité des données sur les arbres de rue. Nous avons utilisé le logiciel *i-Tree Eco version 6* pour calculer dix services produits par les arbres de rue. Ensuite, nous analysons l'équité en faisant des corrélations entre les dix SE et les quatre groupes de populations vulnérables. Enfin, nous calculons trois indices composites afin de quantifier et cartographier les priorités de plantation.

Les calculs de SE montrent qu'en moyen les secteurs de recensement ont une canopée des arbres de rue de 4,27 % dans l'ensemble du territoire d'étude. Les arbres de rue contribuent à réduire de 5 % l'index d'UV. Annuellement, ils réduisent de 75 703 m³ d'eau et permettraient l'évapotranspiration de 1 623 998 m³ d'eau supplémentaires sur l'ensemble de ce territoire. Ils y retirent de l'atmosphère 699 850 kg de carbone (C), 446 kg de monoxyde de carbone (CO), 4 722 kg de dioxyde d'azote (NO₂), 5 126 kg d'ozone (O₃), 1 336 kg de particules fines d'origines anthropiques (PM_{2,5}) et 1 432 kg de dioxyde de soufre (SO₂) par an. La biomasse des arbres de rue constitue une réserve de carbone de 44 964 900 kg

augmentant chaque année d'environ 699 850 kg. Par contre, les SE sont fortement corrélés ce qui nécessite la création d'un indice composite qui résume les variances des SE.

Quant à l'analyse de l'équité, les SE sont significativement corrélés négativement avec les minorités visibles, les ménages à faible revenu et les aînés dans cet ordre d'importance. Pour leur part, les enfants sont corrélés positivement avec la production de composés organiques volatils ($p < 0,01$) ce qui représente une iniquité pour les enfants allergiques au pollen.

Finalement, l'Indice composite n° 3, soit les priorités de plantation, montre que les secteurs de recensement classés de *priorité de plantation élevée (H)* et *très élevée (I)* sont principalement dans les arrondissements Saint-Laurent, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles et Saint-Léonard ainsi que dans l'ouest de Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension. L'outil développé dans cette étude (notamment les indices composites) pourrait être modulé et modifié selon les besoins locaux de chaque territoire. Nos résultats contribuent à revoir la manière dont les SE pourraient être utilisés de façon opérationnelle en planification et en verdissement, dépassant ainsi l'usage du concept en sensibilisation et en éducation publique.

MOTS-CLÉS

Arbre de rue, végétation urbaine, forêt urbaine, équité environnementale, indice composite, Montréal

ABSTRACT

Cities are increasingly facing multiple environmental issues such as urban heat islands, various types of pollution, climatic changes and water management, which are having negative impacts on public health. Urban trees play an important role in mitigating these problems through their ecosystem services (ES). Yet, their distribution and services pose an environmental equity issue in the access to these benefits at the intra-city level. In this study, we are interested in Montréal street trees ES with the following research questions:

- 1) What are the quantities of ecosystem services produced by street trees in Montréal – in terms of filtered water, decontaminated air, produced oxygen, intercepted ultraviolet radiation and canopy – and what are their spatial variations through this city?
- 2) Concerning environmental equity, among the four vulnerable population groups (children (<15 years old), the elderly (65 years old and beyond), low-income households and visible minorities), do some have a more limited access to ES provided by street trees?
- 3) What would be the utility of a composite indicator specific to each borough of Montréal in planning their interventions according to their specific needs (determined by their geographic and natural conditions and their demographic and socioeconomic profile)?

The study area covers 15 of the 19 Montréal City's boroughs chosen according to street trees data availability. We use of the *i-Tree Eco version 6* software to calculate ten ecosystem services produced by street trees. Then, we analyze the equity by computing correlations between the ten ES and the four vulnerable population groups. Finally, we calculate a composite indicator representing tree plantation priorities.

On average, the census tracts have a canopy of street trees of 4,27% on the entire study area. Street trees contribute to reducing UV index by 5%. Annually, they reduce runoff by 75 703 m³ of water and permit the evapotranspiration of additional 1 623 998 m³ of water on the overall territory. They remove of the atmosphere 699 850 kg of carbon (C), 446 kg of carbon monoxide (CO), 4 722 kg of nitrogen dioxide (NO₂), 5 126 kg of ozone (O₃), 1 336 kg of fine particulate matter of anthropogenic origins (PM_{2.5}) and 1 432 kg of sulfur dioxide (SO₂) per year.

As for the equity analysis, ES are negatively significantly correlated with visible minorities, low-income households and the elderly, in this order of importance. Children are positively

significantly correlated with production of volatile organic compounds ($p < 0,01$) which represent an inequity for pollen-allergic children.

Finally, the Composite indicator n° 3, plantation priorities, shows that census tracts classed as *high plantation priority (H)* and *very high (I)* are mainly in Saint-Laurent, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles and Saint-Léonard boroughs as well as in the West of Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension. The tool developed in this study could be modified according to each borough's needs. Our results contribute to rethinking how ES could be operationally used in planning and in greening, thus exceeding the use of this concept in environmental awareness and education.

KEYWORDS

Street tree, urban vegetation, urban forest, environmental equity, composite indicator, Montréal

INTRODUCTION

En 2010, nous avons franchi le cap de la majorité de la population vivant en milieu urbain. Cette croissance n'est pas sur le point de s'arrêter selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS) qui prévoit une augmentation de 10% d'ici 2030 et de 20% pour 2050 (Organisation mondiale de la santé (OMS, 2010). Combinées aux changements climatiques, les problématiques environnementales actuelles sont d'autant plus préoccupantes. Il est question des îlots de chaleurs, du manque de biodiversité, de l'érosion, du ruissellement, de la qualité de l'eau, de l'accès à l'eau potable et aux aliments ainsi que des pollutions atmosphérique et sonore (Levrel *et al.*, 2017; Preston et Raudsepp-Hearne, 2017; Sæbø *et al.*, 2017).

Il est démontré que les écosystèmes pourraient diminuer des problématiques environnementales du milieu urbain, en régulant le climat, le ruissellement, l'érosion, la qualité de l'air et de l'eau en plus d'approvisionnant en eau potable et en aliments ou en favorisant leur production du moins (Groupe de travail sur le cadre conceptuel de l'Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire (Millennium ecosystem assessment, *MEA*, 2003; Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). Un écosystème est un ensemble de taille très variable formé d'éléments naturels fonctionnant en interdépendance (*MEA*, 2003). Ces éléments naturels sont la nature inerte ainsi que de communautés de végétaux, d'animaux (incluant l'humain) et de micro-organismes (*ibid.*). Les arbres composent une part colossale des végétaux en ville et rendent, conséquemment, des quantités importantes de SE en milieu urbain (par exemple, Dobbs *et al.*, 2017; Pham *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018). Un écosystème opère et perdure grâce à un équilibre fragile entre ses éléments et leur biodiversité. Enfin, les écosystèmes procurent aussi des bénéfices culturels, économiques, sanitaires et sociaux à l'Homme (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017; Locke et al., 2010; Frank, Engelke et Schmid, 2003).

Ces bénéfices rendus par la nature en général ou par les arbres plus particulièrement sont appelés les services écologiques (SE). Connaître les SE serait important pour mieux planifier la plantation d'arbres afin d'augmenter les SE dans des zones en besoin tant du point de vue environnemental que social. Il peut s'agir, par exemple, des zones sujettes aux inondations ou aux pollutions ou, encore, des secteurs à revitaliser comme cela a été montré pour quelques villes américaines (Locke *et al.*, 2010; Morani *et al.*, 2011). Actuellement, l'évaluation des SE et l'implantation d'infrastructures vertes sont le tournant que prennent plusieurs villes pour remédier aux enjeux environnementaux. Certes, la littérature dans ces domaines est encore loin d'offrir un examen exhaustif pour une ville donnée. D'ailleurs, la dimension sociale, qui pourrait être traduite par l'intégration des données socioéconomiques (pour les besoins socioéconomiques) ou d'accès à la végétation ou aux SE, n'y est pas toujours prise en compte.

Dans cette étude, nous mesurons les SE des arbres de rue à Montréal grâce au logiciel *i-Tree Eco version 6* d'abord. Ensuite, nous les analysons sous l'angle de l'évaluation de l'équité environnementale puis de la planification du verdissement urbain. Nous posons les trois questions de recherche suivantes :

1. Quelles sont les quantités de services écologiques produits par les arbres de rue à Montréal – en termes d'eau filtrée, d'air dépollué, d'oxygène produit, de rayons ultraviolets (UV) interceptés, de canopée – et quelles sont leurs variations spatiales à travers cette ville ?
2. Concernant l'équité environnementale, parmi les quatre groupes de population retenus (les enfants (< 15 ans), les aînés (65 ans et plus), les ménages à faible revenu et les minorités visibles), certains ont-ils un accès nettement plus limité aux SE fournis par les arbres de rue ?
3. Quelle serait l'utilité d'un indice composite propre à chaque arrondissement dans la planification de leurs interventions en regard de leurs besoins spécifiques qui sont déterminés par leurs conditions géographiques et naturelles ainsi que par leur profil démographique et socioéconomique ?

Pour répondre à ces questions, le présent mémoire est divisé en six chapitres. Le premier expose les enjeux environnementaux auxquels les milieux urbains contemporains doivent faire face puis comment les arbres peuvent aider les villes à y pallier. Par la suite, un portrait des iniquités d'accès aux arbres au Canada et aux États-Unis d'Amérique est dressé. Subséquemment, nous présentons le contexte et les enjeux du site à l'étude, la Ville de Montréal. Enfin, les questions de recherche et les limites de la zone d'étude puis la pertinence et les apports de l'étude sont présentés. Le second chapitre se consacre aux trois concepts clés de notre recherche : les services écologiques, la justice environnementale et l'équité environnementale ainsi que la planification de la plantation d'arbres selon les besoins et la canopée existante. La méthodologie est, ensuite, présentée dans le troisième chapitre. Deux chapitres de résultats s'en suivent : l'un abordant la quantité et la variation spatiale des SE, l'autre, les disparités ainsi que les besoins socioéconomiques et environnementaux. L'étude se termine sur un chapitre dédié à la discussion de la méthode employée, des implications des iniquités soulevées, de ses limites et des pistes d'amélioration des indices composites créés ainsi qu'à nos recommandations pour la plantation d'arbres sur le territoire d'étude.

1. CHAPITRE I PROBLÉMATIQUE

1.1. INTRODUCTION

Ce premier chapitre a pour but d'établir la pertinence de la présente recherche. Nous y aborderons, d'abord, les enjeux environnementaux contemporains du milieu urbain, soit la chaleur urbaine, les différentes formes de pollution, la gestion de l'eau et le maintien des écosystèmes incluant les risques reliés à la perte de biodiversité. Ensuite, nous verrons comment la forêt urbaine contribue à la lutte contre ces problèmes. Par la suite, nous discuterons de la nécessité d'étudier les inégalités dans l'accès aux arbres urbains et leurs bénéfices. Nous montrerons que l'accès aux bénéfices des services écologiques (SE) peut varier selon les groupes de population définis par l'âge, le revenu ou l'appartenance ethnoculturelle. Après coup, la canopée, les besoins en gestion environnementale et la pertinence de la zone d'étude sont dépeints. Enfin, nous définirons le territoire à l'étude et ses enjeux spécifiques. Nous terminerons par l'élaboration des questions de recherche puis par les apports de l'étude.

1.2. ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DU MILIEU URBAIN

En 2010, nous avons franchi le cap de la majorité de la population vivant en milieu urbain. Cette croissance n'est pas sur le point de s'arrêter selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS) qui prévoit une augmentation de 10 % d'ici 2030 et de 20 % pour 2050 (OMS, 2010). Dans ce contexte, les problématiques environnementales actuelles sont d'autant plus préoccupantes. Il est question des îlots de chaleurs, du manque de biodiversité, de l'érosion, du ruissellement, de la qualité de l'eau, de l'accès à l'eau potable et aux aliments ainsi que des pollutions atmosphérique, sonore, visuelle, lumineuse, hydrique et du sol (Blais *et al.*, 2012; Côté, 2006; Fletcher, 1996; Levrel *et al.*, 2017; MDDELCC, s. d.; Preston et Raudsepp-

Hearne, 2017; Sæbø *et al.*, 2017; Smetacek et Zingone, 2013). Dans les sections suivantes, ces problèmes environnementaux sont discutés en détail.

1.2.1. Chaleur urbaine

La chaleur urbaine est un enjeu d'échelle planétaire. De façon générale, le thermomètre varierait de 0,56 à 5,6°C entre les milieux urbains et ruraux (Roach, 2006). Les études en télédétection des radiations thermiques de la Terre rapportent que les villes peuvent créer leur propre climat local (Roach, 2006) en raison des conditions particulières du milieu urbain, qui favorisent les îlots de chaleur. Plus spécifiquement, la chaleur générée par une ville favorise la condensation de l'eau qui retombera inévitablement sous la forme de précipitations. La chaleur urbaine est habituellement étudiée sous trois angles : les vagues de chaleur, les îlots de chaleur et l'exposition aux rayons UV (Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), s. d. a). Rappelons que les îlots de chaleur sont formés par le cumul de plusieurs facteurs : les gaz à effet de serre, la perte progressive de végétation, les propriétés thermiques, la chaleur anthropique et la morphologie urbaine (INSPQ, s. d. a). La plupart de ses facteurs sont dus à la (sur)minéralisation de l'environnement qui est fréquente en ville. À cela s'ajoute le réchauffement climatique qui amplifie ce problème de chaleur accablante. Finalement, les îlots de chaleur altèrent la qualité de l'air en contribuant à la diffusion des polluants et du smog (voir une revue dans Limoges, 2017).

1.2.2. Différentes formes de pollutions du milieu urbain

En milieu urbain, les principales formes de pollution sont visuelle, sonore, atmosphérique, hydrique et du sol. La pollution visuelle est la présence d'irritants visuels, certes d'ordre subjectif, pour la population (Côté, 2006 dans Pilon, 2015b). Ainsi, plusieurs infrastructures (principalement autoroutières et de services publics). Les industries et les friches industrielles peuvent générer de la pollution visuelle pour la population environnante.

Quant à la pollution sonore, elle aurait des conséquences néfastes lorsque le bruit excède 55 dB(A) ou 65 dB(A) dépendamment des études (Carrier *et al.*, 2016b). Concernant

les répercussions négatives, on distingue l'exposition à court terme et à long terme ainsi que différents niveaux de bruit (bas et élevé). L'exposition au bruit à long terme entraîne la perte de sommeil, la haute pression artérielle, le développement de maladies cardiovasculaires, les problèmes liés au diabète, la perte d'audition, et l'augmentation des difficultés cognitives chez les enfants (Carrier *et al.*, 2016b). L'exposition à court terme, quant à elle, diminue la qualité de vie en accroissant le stress, la fatigue, les maux de tête puis, conséquemment, les accidents de travail, les comportements antisociaux, la mémoire et les émotions via la perturbation de la représentation neurale des stimuli du son (Gourévitch *et al.*, 2014).

La pollution sonore a, pour principale source, le bruit automobile selon la littérature (Côté, 2006). D'ailleurs, il est considéré comme la deuxième nuisance en importance pour la santé et le bien-être après la pollution atmosphérique d'après l'OMS (OMS, 2011 dans Carrier *et al.*, 2016b).

L'OMS définit la pollution atmosphérique comme étant « la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère » (OMS, s. d.). Le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone (O₃), dioxyde de soufre (SO₂) et les particules fines (PM_{2,5}) sont des polluants atmosphériques reconnus comme étant dommageables pour la santé et l'environnement (Pui *et al.*, 2014). Dans les milieux urbains, ces polluants sont essentiellement produits par le transport, les industries et la production d'énergie industrielle ou domestique (chauffage et cuisson) (OMS, 2010; Sæbø *et al.*, 2017).

La pollution hydrique est la présence de métaux et de minéraux dans l'eau en concentration anormale. Les impacts de l'urbanisation – soit les égouts rejetant de grandes quantités de nutriments ainsi que les diminutions du couvert végétal et des sols perméables – font en sorte qu'il y a un surplus d'azote (N) et de phosphore (P) dans les eaux et les sols ainsi que d'oxydes d'azote (NO_x) dans l'air à toutes les échelles.

Enfin, la pollution des sols est particulièrement préoccupante depuis les dernières années avec l'engouement récent pour l'agriculture urbaine. En effet, « [u]rban soils and waters are

affected by centuries of contamination from industry and traffic, both directly and through air pollutant and often show elevated levels of a wide range of organic compounds and elements » (Sæbø *et al.*, 2017, p. 113).

1.2.3. Gestion de l'eau

La perte de végétation due à l'urbanisation a un impact important à la fois sur la qualité et l'écoulement naturel des eaux (Pickett *et al.*, 2007). L'imperméabilité des sols, qui est liée à la (sur)minéralisation en milieu urbain, provoque du ruissellement, c'est-à-dire la concentration d'un courant d'eau cherchant un point d'entrée. Lorsqu'il l'aura trouvé, la pression creusera la terre. Ainsi, la (sur)minéralisation responsable du ruissellement a, pour conséquence à long terme, d'abaisser les nappes phréatiques. Le ruissellement entraîne la perte des sols vers les cours d'eau, mais il n'en est pas la cause principale. L'érosion est principalement due au manque de racines pour retenir le sol lorsqu'il y a une vague ou la marée.

1.2.4. Maintien des écosystèmes

Des pratiques liées à la production et à la reproduction de la forêt urbaine menacent la conservation des écosystèmes. Plus spécifiquement, on compte le rétrécissement et la déconnexion des espaces verts, qui réduisent la connectivité des espaces verts, ainsi que la « plantation monotone », qui rend la forêt urbaine dépourvue sur le plan de la biodiversité.

La connectivité des espaces verts, des cours d'eau et des milieux humides est importante, et cela, pour plusieurs raisons (Quenneville, 2017). Premièrement, un corridor écologique apporte un environnement moins stressant pour la faune, car les frontières entre un espace vert et les activités anthropiques sont distancées. Deuxièmement, les animaux ont accès à plus de nourriture et de façon plus sécuritaire lorsque les espaces verts sont moins déconnectés. En effet, ils auront moins besoin de se déplacer entre ces espaces et, ainsi, de traverser des infrastructures routières. Troisièmement, les corridors écologiques augmentent la fréquence de contact avec d'autres animaux. Cela accroît les possibilités d'accouplement.

On s'inquiète pour la survie de la faune et de la flore en ville. D'abord, l'urbanisation et les activités humaines polluent et réduisent les habitats naturels en plus de perturber la reproduction et l'approvisionnement des animaux et des végétaux. Puis, la canopée est menacée par les épidémies de maladies et d'insectes ravageurs. À cela, s'ajoute une mauvaise technique de reproduction d'environnements naturels. En effet, les espaces verts urbains manquent souvent de diversité d'espèces végétales et de diversité structurelle. On entend par « diversité structurelle de la forêt » la variation de la forme des végétaux et de leur hauteur. Jasmani *et al.* (2017) démontrent que la diversité de la végétation totale et de sa structure semble favoriser l'abondance et la diversité animale ou, du moins, d'oiseaux (Jasmani *et al.*, 2017).

En somme, cette section a pointé les problèmes environnementaux et sanitaires auxquels les villes font face. Dans la prochaine section, nous expliquons le rôle joué par les arbres urbains dans la réduction de l'ampleur de ces problèmes environnementaux.

1.3. RÔLE DE L'ARBRE EN VILLE

Les arbres offrent les mêmes services aux humains autant dans le milieu rural qu'urbain. Toutefois, en raison de leur rareté en ville, leur rôle dans le bon fonctionnement de « l'écosystème urbain » est amplifié. En effet, les arbres régulent le climat, le ruissellement, l'érosion, la qualité de l'air et de l'eau en plus d'approvisionner en eau potable et en aliments ou, du moins, en favorisant leur production (MEA, 2003; Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). De plus, la diversité génétique des arbres améliore la résistance d'une essence aux changements environnementaux (Padoa-Schioppa et Canedoli, 2017). La diversité génétique chez les arbres est la variété de gènes à même une essence (Padoa-Schioppa et Canedoli, 2017). On reconnaît également les arbres pour leurs bénéfices culturels, sanitaires, sociaux et économiques pour l'Homme en lien avec la santé mentale et physique, le sentiment d'appartenance, la criminalité et l'attractivité des espaces urbains (Frank *et al.*, 2003; Locke *et al.*, 2010; Preston et Raudsepp-Hearne, 2017).

Les bienfaits produits par la nature en général, mais, plus souvent, par les arbres et, parfois, par les autres végétaux sont appelés les services écologiques (SE). Serpantié *et al.* (2012, p. 2) définissent les SE comme étant le « modèle incontournable du lien entre le fonctionnement des écosystèmes et le bien-être humain ». L'usage de ce concept est grandissant dans les politiques publiques nationales et internationales suite au rapport de *l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (MEA)* de l'ONU en 2001 (MEA, 2003).

Les services écologiques ou écosystémiques (SE) proviennent d'une fusion entre l'écologie et l'économie. Ainsi, les premiers auteurs qui évaluaient les SE avaient tendance à se pencher sur une ou l'autre de ces disciplines en priorisant soit la conservation des écosystèmes, soit son coût de remplacement. Depuis la fin des années 1990, on voit davantage une fusion de ces deux courants de pensée. Désormais, on évalue, à la fois, les bénéfices des SE en termes écologiques (par exemple, en quantité d'eau de ruissellement ou en réduction de la pollution atmosphérique) et en termes monétaires (par exemple, en économie en gestion d'eau ou en services de santé).

1.3.1. Réduction de la chaleur urbaine et des impacts du rayonnement solaire

La forêt urbaine réduit la température ambiante grâce à sa canopée. Premièrement, les feuilles d'arbres collectent et emmagasinent l'eau de pluie. Lorsque le mercure grimpe, deux phénomènes se produisent : l'évapotranspiration et la réduction des rayons ultraviolets (UV). L'évapotranspiration a lieu quand l'eau déposée sur les feuilles s'évapore ou lorsque l'eau emmagasinée est « suée » par les feuilles (*i-Tree*, 2017b). La couronne d'un arbre intercepte les rayons du soleil réduisant, ainsi, la quantité de rayons UV atteignant le sol. Cela génère deux bénéfices majeurs : les réductions des risques pour la santé humaine associés aux UV (cancer de la peau, des troubles oculaires et immunitaires) et de la sécheresse des points d'eau (Gies *et al.*, 2018; INSPQ, s. d. c).

1.3.2. Réduction de différentes formes de pollutions du milieu urbain

Tout d'abord, la végétation sert de barrières à la pollution visuelle et sonore. D'ailleurs, le ministère des Transports du Québec propose l'utilisation « d'écrans-buissons » qu'il appelle aussi « écrans végétaux » ou « écrans de végétation » pour limiter les nuisances sonores, mais aussi visuelles produites par la vue d'un axe routier (André et Gagné, 1997). La végétation peut également être ajoutée sur un mur antibruit conventionnel. De plus, le seuil de tolérance au bruit semble augmenter grâce à l'apport esthétique des écrans végétaux (Prieur, 1988 dans André et Gagné, 1997, p. 60). Cela pourrait s'expliquer par le fait que la vue d'un espace vert — particulièrement d'un plan d'eau — réduit le stress et l'énerverment en plus d'augmenter le bien-être, le niveau d'éveil et la concentration (Hartig, 2008; Ulrich, 1981), soit des symptômes comparables à l'exposition à court ou à long terme au bruit excessif (voir Section 1.2.2).

Un autre bénéfice du caractère esthétique des arbres, moins constant toutefois, est l'attractivité de l'environnement urbain (Frank *et al.*, 2003; Mitchell et Popham, 2008 dans Hartig, 2008). Elle promeut l'activité physique et réduit ainsi les risques d'obésité chez la population (Frank *et al.*, 2003). Plus précisément, Hartig (2008) cite trois études démontrant que c'est l'attente qu'on a par rapport au potentiel de « restauration psychologique » des espaces verts qui influence leur attractivité en tant que lieu de promenade (Staats *et al.*, 2003; Staats et Hartig, 2004; Hartig et Staats, 2006 cités dans Hartig, 2008). D'ailleurs, Hartig (2008, p. 1614) avance aussi que « physical activity yields more beneficial emotional, cognitive, and physiological effects in natural environments compared with commonplace urban outdoor spaces ».

Concernant la pollution de l'air, les arbres urbains contribuent à diminuer la quantité de polluants présents dans l'air en réduisant la chaleur et donc la formation du carbone et de PM_{2,5} (voir Section 1.2.1). En plus, les arbres contrecarrent les polluants atmosphériques en leur servant de réceptacle : les feuilles et le tronc des arbres offrent une surface de dépôt aux polluants (Hampp et Höll, 1974). Les polluants peuvent se déposer sur un tronc d'arbre

de deux façons : directement et en coulant des feuilles le long du tronc pour s'y fixer ou pour atteindre le sol (Hampp et Höll, 1974). Finalement, les arbres absorbent et métabolisent des polluants atmosphériques. Ce processus est aussi appelé la séquestration (Aguaron et McPherson, 2012). L'interception (dépôt sur les feuilles) et la séquestration sont deux modes de retrait des polluants qui s'appliquent différemment à chacun d'eux selon leur composition (gaz ou particule) (Nowak *et al.*, 2018).

La forêt urbaine sert aussi de barrière coupe-vent. Alors, elle atténue les rafales (MDDELCC, s. d.; Schroeder et Anderson, 1984) et, du fait même, la dispersion des polluants (Nowak *et al.*, 2014).

Enfin, relativement aux pollutions hydrique et du sol, les arbres absorbent des nutriments par leurs racines. Certains de ces nutriments sont considérés comme des polluants en raison de leur concentration anormale dans le sol causée par les activités humaines mentionnées plus tôt. Ainsi, les arbres régulent la qualité de l'eau et, indirectement, du sol en la dénitrifiant et en la déphosphorant (Gravel, 2017; Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). Les essences les plus gourmandes en eau et (évapo)transpirant le plus comme le saule sont des outils efficaces et moins coûteux que les usines d'épuration pour décontaminer les eaux usées (Gravel, 2017). Les eaux usées renfermant des quantités considérables d'azote (N) et de phosphore (P), en absorbant cette eau, les arbres utilisent le P pour sa croissance et absorbe le N puis rejettent de l'eau pure (Gravel, 2017). Ce phénomène est une phytotechnologie nommée « phytoremédiation » (Société québécoise de phytotechnologie (SQP), 2017). La Société québécoise de phytotechnologie (SQP) (2017) souligne qu'elle peut aussi s'appliquer à la décontamination des eaux industrielles ou souterraines et des sites d'enfouissement.

1.3.3. Contribution à la gestion de l'eau

Concernant la gestion de l'eau, en plus de filtrer des polluants présents dans l'eau, les arbres réduisent le ruissellement en interceptant et en absorbant la pluie par leurs feuilles ou par leurs racines. Cette phytotechnologie est appelée « génie végétal » (SQP, 2017). Selon le MDDELCC (s. d.), chaque accroissement de 5 % de la canopée d'une ville réduirait de 2 % son

volume d'eau de ruissellement. Alors, la régulation du ruissellement par les arbres allège la pression sur les systèmes d'égouts (pluviaux ou combinés selon la ville) (MDDELCC, s. d.; SQP, 2017). Donc, les besoins en réparation et en construction d'infrastructures hydriques sont aussi réduits. En effet, la minéralisation et l'accroissement de la population font augmenter la quantité d'eau entrant dans les égouts, qui tendent à ou produisent déjà la saturation des canalisations dans les villes (Livesley *et al.*, 2016; Ville de Montréal, Comité de suivi du projet d'optimisation du réseau d'eau potable, 2011). De plus, la réduction du ruissellement lutte contre l'érosion (MDDELCC, s. d.; SQP, 2017) et l'abaissement des nappes phréatiques (Pickett *et al.*, 2007), qui ont des impacts économiques négatifs comme nous l'avons dit plus tôt.

1.3.4. Maintien des écosystèmes

Les arbres participent à la connectivité des espaces verts, qui est menacée par l'urbanisation (Dobbs *et al.*, 2014; Fahrig, 2003 dans Zhou *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2011). Habituellement, ils sont des constituants essentiels des corridors écologiques en ville, notamment dans les parcs ainsi que le long des rues et des cours d'eau. Ces derniers sont favorables aux animaux en leur offrant de plus grands espaces de vie (Dobbs *et al.*, 2014; Fahrig, 2003 dans Zhou *et al.*, 2011) et de la nourriture. De plus, le rôle des arbres dans la régulation du climat et du ruissellement protège les habitats fauniques, floristiques et humains.

Dans la présente section de chapitre, nous avons décrit le rôle des arbres en ville. Dans la section subséquente, nous voyons que la forêt urbaine n'est pas distribuée de façon égale à travers la ville, engendrant un accès inégal et inéquitable aux bénéfices fournis par les arbres pour certains groupes de population.

1.4. INIQUITÉ DANS L'ACCÈS AUX ARBRES ET À LEURS BÉNÉFICES EN VILLE

De nombreuses études dans plusieurs pays ont démontré qu'il existe des disparités dans l'accès à la végétation urbaine. En d'autres termes, certains groupes de population résident

dans des secteurs moins verdoyants ou moins arborés de leur ville. Notons les groupes qui sont vulnérables physiologiquement (les enfants et les aînés) ou socioéconomiquement (les ménages à faible revenu et certains groupes ethnoculturels).

Plus spécifiquement, les recherches aux États-Unis d'Amérique en équité environnementale sur la végétation urbaine se penchent souvent sur la relation entre la canopée, le revenu et les groupes ethnoculturels susceptibles d'être discriminés, soit les Asiatiques, les Afro-Américains et les Latino-Américains. Schwarz *et al.* (2015) découvrent que le revenu n'est pas toujours associé positivement et significativement avec la canopée. En effet, cette association n'est pas significative pour Baltimore et Los Angeles, mais est significativement négative pour New York et Raleigh. Concernant les groupes ethnoculturels, Schwarz *et al.* (2015) observe aussi des changements importants entre les associations à travers des villes états-uniennes. On en retient, d'une part, qu'il existe une association significative et positive entre la présence de canopée et d'Afro-Américains à Baltimore, New York et Philadelphie. D'autre part, l'association entre la canopée et les Latino-Américains est significativement positive à Philadelphie, mais négative à New York. La relation entre canopée et Asiatiques est significativement négative à Los Angeles et à New York. De plus, il y a absence de corrélation (une fois spatialement contrôlée) entre ces trois groupes et la canopée à Raleigh, Sacramento et Washington DC.

Au Canada, plusieurs études dans ce champ de recherche ont aussi été menées récemment. À Montréal, les enfants et les aînés ne sont pas victimes d'inégalité environnementale en matière d'accessibilité à la végétation (Apparicio *et al.*, 2016). Par contre, des associations négatives entre le couvert végétal et les personnes à faible revenu ainsi que les minorités visibles ont été observées pour les trois métropoles canadiennes dont Montréal fait partie (Montréal, Toronto et Vancouver : Tooke *et al.*, 2010 dans Apparicio *et al.*, 2013; Montréal : Apparicio *et al.*, 2016; Apparicio *et al.*, 2013; Pham *et al.*, 2012). Toutefois, les associations entre les minorités visibles et d'autres indicateurs de végétation ne se sont pas avérées significatives dans les trois principales villes canadiennes (Tooke *et al.*, 2010 dans Apparicio *et al.*, 2013). Cependant, Pham *et al.* (2012) nuancent ces résultats en démontrant deux

points. D'une part, les minorités visibles entretiennent une relation négative significative ($p < 0,001$) avec les arbres ou les arbustes de rue. D'autre part, les minorités visibles sont faiblement ($p < 0,1$), mais positivement corrélées avec les arbres et les arbustes de cours arrière. Ainsi, les auteurs avancent que l'accès à la végétation chez les minorités visibles est moindre dans le domaine public, mais supérieur dans le privé (Pham *et al.*, 2012). Comme ce groupe a un revenu plus faible que pour l'ensemble de la population (Apparicio *et al.*, 2016), il est susceptible de subir un cumul d'inégalité. De plus, les présences des minorités visibles et des ménages défavorisés ne sont pas négligeables dans la Ville de Montréal, soient 34 % (2016) et 19 ou 23 % (2015) selon la méthode de calcul du *seuil de faible revenu* (SFR) ou de la *mesure de faible revenu* (MFR), respectivement (Statistique Canada, 2017a).

Cette revue de littérature montre qu'à Montréal la plantation d'arbres de rue, en particulier, et en ville généralement devrait prendre en compte des facteurs socioéconomiques et démographiques afin de réduire les inégalités dans l'accès aux SE fournis par les arbres. Certes, d'autres enjeux urbains devraient également être considérés lors de la planification de la plantation d'arbres, soit les enjeux environnementaux. La prochaine section témoigne méticuleusement de ces enjeux.

1.5. CANOPÉE ET BESOINS EN GESTION ENVIRONNEMENTALE À MONTRÉAL

Dans cette section, nous présentons, dans un premier temps, l'état du couvert végétal à Montréal en abordant sa canopée et ses arbres de rue. Dans un second temps, nous justifions la pertinence de la Ville de Montréal comme zone d'étude.

1.5.1. Forêt urbaine montréalaise

En 2007, la part de l'agglomération de Montréal couverte par la canopée s'élevait à 20,3 % et à 19,1 % pour la Ville de Montréal d'après l'analyse de photographies aériennes (Direction des grands parcs et du verdissement (DGPV), Division de l'arboriculture, 2011; DGPV et Société de verdissement du Montréal métropolitain (SOVERDI), 2012). Montréal ne fait pas

exception à la règle générale qui veut que l'occupation du sol soit une variable explicative majeure de la variation de l'indice de canopée (DGPV, Division de l'arboriculture, 2011). Les espaces verts, c'est-à-dire les parcs (publics) qu'ils soient des espaces naturels ou récréatifs, composent l'occupation du sol la plus verdoyante avec 45 % d'indice de canopée (DGPV, Division de l'arboriculture, 2011). Les sites industriels et les terrains commerciaux sont les espaces les plus dénudés avec environ 3 % de canopée (DGPV, Division de l'arboriculture, 2011). L'indice de canopée moyen de la fonction résidentielle est de 18 % (DGPV, Division de l'arboriculture, 2011). Il varie de 14 à 24 % selon la densité du cadre bâti¹. Il est à son plus bas (8 %) dans les secteurs résidentiels de haute densité de l'arrondissement de Lachine (DGPV, Division de l'arboriculture, 2011).

En matière d'essences, les forêts urbaines sont plus diversifiées que celles naturelles ou naturalisées (Aguaron et McPherson, 2012; DGPV, Division de l'arboriculture, 2011). Nous avons répertorié 54 genres d'arbres de rue dans la Ville de Montréal² grâce à la base de données des arbres publics, qui sera décrite au Chapitre 3.

L'étude des arbres de rue est particulièrement pertinente à Montréal, ils constituent une source de SE gérée par des instances publiques. Il est primordial d'assurer une distribution égale à travers la ville.

1.5.2. Pertinence de la zone étudiée

Le choix de la Ville de Montréal pour cette étude est justifié par les cinq raisons suivantes. Premièrement, le *Plan d'action canopée 2012-2021* de la Direction des grands parcs et du verdissement (DGPV) de la Ville de Montréal en collaboration avec la Société de verdissement du Montréal métropolitain (SOVERDI) a pour objectif de « faire passer l'indice de canopée de 20[,3] % [en 2007] à 25 % d'ici 2025 » dans l'agglomération de Montréal (DGPV, Division de l'arboriculture, 2011, p. 171; DGPV et SOVERDI, 2012, p. 3) et de 19,1 % à 25 % dans la Ville

¹ Les niveaux de densité (faible, moyenne ou élevée) réfèrent à la typologie résidentielle du cadre bâti. Pour plus d'information, voyez l'*Annexe II* de DGPV, Division de l'arboriculture, 2011).

² Après la correction du nom des essences, nous comptons 54 genres d'arbres de rue sur le territoire à l'étude.

de Montréal (DGPV, Division de l'arboriculture, 2011). Depuis sa création en 1992, l'organisme à but non lucratif SOVERDI se donne pour mission d'accroître la forêt urbaine en « plantant le bon arbre au bon endroit » dans des perspectives de santé publique, de qualité de vie et d'accès à la végétation (SOVERDI, s. d.). Elle appuie les compagnies, les organismes et les groupes de particuliers dans toutes les étapes de leur projet de verdissement (SOVERDI, s. d.). Le *Plan d'action canopée 2012-2021* vise les secteurs de la ville qui sont déficitaires face à cet objectif de couverture arborée (DGPV et SOVERDI, 2012).

Deuxièmement, la métropole a besoin d'une bonne couverture d'arbres afin de diminuer les impacts négatifs des canicules et des îlots de chaleur. Les changements climatiques provoqueraient des épisodes de chaleur accablante, à Montréal, définie comme étant la combinaison d'une température supérieure ou égale à 30°C et d'une température ressentie de 40 °C ou plus avec l'indice humidex (Environnement Canada, 2016a dans Limoges, 2017, p. 4). Ces vagues de chaleur entraîneraient plusieurs morts prématurées surtout chez les personnes âgées. La chaleur accablante affecte particulièrement la santé des personnes vulnérables, soit les enfants en bas âges, les aînés et les personnes atteintes de troubles de santé mentale ou de maladies chroniques (INSPQ, s. d. b; INSPQ, 2009; Santé Canada, 2011a; Tomlinson, Chapman, Thornes, & Baker, 2011 cités dans Limoges, 2017, p. 4).

Comme nous l'avons mentionnée plus tôt, le *Plan d'action canopée 2012-2021* reconnaît que certains secteurs de la Ville de Montréal sont dépourvus de canopée. Il admet aussi que les sites étant couverts par moins de 25 % de canopée sont sujets à être des îlots de chaleur qui peuvent affecter la santé et la qualité de vies des résidents (DGPV et SOVERDI, 2012).

Troisièmement, il est primordial d'améliorer la gestion de l'eau à Montréal. La saturation des égouts produit des refoulements d'eaux usées à chaque averse, surtout l'été. Ce phénomène nommé « subversion » afflige principalement les quartiers anciens. Le cas de Lachine est particulièrement problématique en raison de sa proximité à deux cours d'eau. Des eaux usées se déversent plusieurs fois par année dans le canal Lachine et dans le fleuve Saint-Laurent. Sur l'île de Montréal, on dénombrait 166 ouvrages de surverse, dont 106 sur le territoire à

l'étude en 2016.³ Il est estimé qu'en 2011, chaque ouvrage de surverse du Québec a débordé en moyenne 12 fois dans l'année, dont 10 fois en raison d'une pluie ou de la fonte de glace ou de neige (Moreira et Boudreault, 2012). Cela a des conséquences négatives sur la faune et la flore en plus de risquer de polluer la nappe phréatique et les cours d'eau naturels.

Dans sa *Stratégie montréalaise de l'eau 2011-2020*, la ville cherche à assurer la qualité et la quantité de son l'approvisionnement en eau ainsi qu'à rattraper le manque d'entretien de son réseau d'aqueduc et d'égout. Pour ce faire, elle doit éviter les bruits de conduit. Cela nécessite la rénovation et l'augmentation des capacités de ses infrastructures. Nous croyons que les infrastructures vertes comme les arbres aideraient à réduire voire à évincer ce besoin tout en respectant davantage la durabilité de la ressource sous la question de son traitement (épuration).

Quatrièmement, la qualité de l'air varie grandement entre les quartiers de la Ville de Montréal. D'une part, les vents dominants transportent vers l'est de l'île de Montréal la pollution atmosphérique des raffineries et des zones industrielles de la métropole. D'autre part, ce serait la proximité aux autoroutes et aux boulevards qui affecterait le plus localement la qualité de l'air (Carrier *et al.*, 2016a; Crouse *et al.*, 2009).

Cinquièmement, à l'heure actuelle, la Ville de Montréal est aux prises avec une infestation d'agrile du frêne, un parasite s'attaquant aux frênes nécessitant leur abattage (DGPV et SOVERDI, 2012). Il serait arrivé au Québec en 2008 et, en 2011, à Montréal (Ressources naturelles Canada, 2016). Ce fléau menace la forêt urbaine en réduisant la couverture d'arbres et, alors, le service de maintien des écosystèmes. Ses ravages amplifieront les problématiques listées précédemment en éliminant une source importante des producteurs de SE que sont les frênes dans la Ville de Montréal. En effet, ils constituent une part importante de la population d'arbres montréalaise.

³ Ces informations ont été produites en utilisant le fichier de données *Ouvrage de surverse* (2016) mis à disposition sur le *Portail données ouvertes* de la Ville de Montréal. < donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/ouvrage-surverse >. Consulté en mai 2018.

Dans ce contexte, il importe d'évaluer quantitativement et spatialement les bénéfices (services écologiques) des arbres urbains à Montréal afin d'aider à établir une planification efficace de plantation d'arbres. Cette dernière nécessiterait aussi un outil méthodologique fiable et opérationnalisable comme la planification basée sur les besoins locaux en services écologiques des arrondissements (en luttant contre les îlots de chaleur ou en améliorant la gestion de l'eau, par exemple). De plus, les plans de verdissement devraient se focaliser sur les zones offrant peu de SE et accueillant une part plus élevée que la médiane du territoire d'une population reconnue comme vulnérable à Montréal c'est-à-dire d'enfants, d'aînés, de ménages à faible revenu ou de minorités visibles conformément à ce qui a été discuté auparavant (voir Section 1.4). Quelques villes états-uniennes ont commencé à planifier leur verdissement et leurs infrastructures vertes en utilisant des bases de données spatiales afin de déterminer des zones prioritaires (Détroit : Meerow et Newell, 2017; New York City : Locke *et al.*, 2010; Morani *et al.*, 2011). Cette étude s'inscrit dans la lignée de ces travaux en explorant le cas de Montréal.

1.6. QUESTIONS DE RECHERCHE ET ZONE À L'ÉTUDE

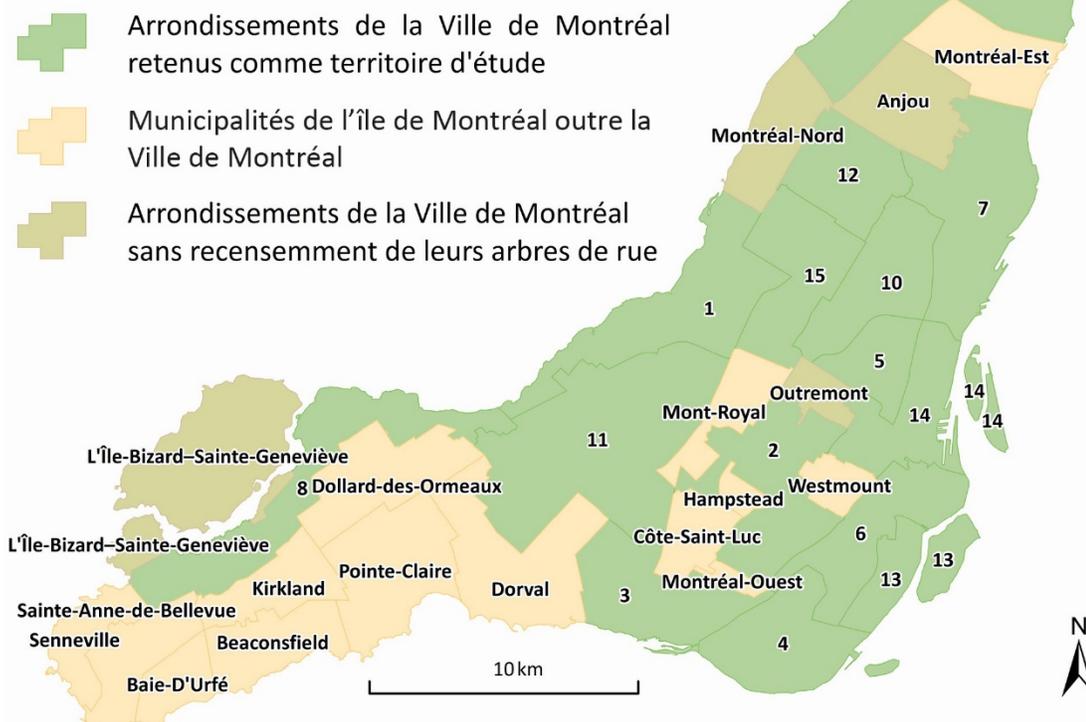
Nous formulons trois questions de recherche :

1. Quelles sont les quantités de services écologiques produits par les arbres de rue à Montréal – en termes d'eau filtrée, d'air dépollué, d'oxygène produit, de rayons ultraviolets (UV) interceptés, de canopée – et quelles sont leurs variations spatiales à travers cette ville ?
2. Concernant l'équité environnementale, parmi les quatre groupes de population retenus (les enfants (<15 ans), les aînés (65 ans et plus), les ménages à faible revenu et les minorités visibles), certains ont-ils un accès nettement plus limité aux SE fournis par les arbres de rue ?
3. Quelle serait l'utilité d'un indice composite propre à chaque arrondissement dans la planification de leurs interventions en regard de leurs besoins spécifiques qui sont déterminés

par leurs conditions géographiques et naturelles ainsi que par leur profil démographique et socioéconomique ?

La zone à l'étude est la Ville de Montréal actuelle soit celle issue de la réorganisation territoriale de 2006. Le choix du territoire étudié se limite à celui de la base de données de l'inventaire des arbres publics de la Ville de Montréal. Par conséquent, elle ne prend pas en compte les arrondissements qui n'ont pas recensé les arbres publics sur leur territoire, soit Anjou, L'Île-Bizard–Sainte-Geneviève, Montréal-Nord et Outremont. Ainsi, nous étudierons les arbres de rue de 15 des 19 arrondissements que la ville comprend (Figure 1.1), à savoir : Ahuntsic–Cartierville, Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Lachine, LaSalle, Mercier–Hochelaga–Maisonneuve, Pierrefonds–Roxboro, Le Plateau-Mont-Royal, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Rosemont–La-Petite-Patrie, Saint-Laurent, Saint-Léonard, Le Sud-Ouest, Verdun, Ville-Marie et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension.

MUNICIPALITÉS DE L'ÎLE DE MONTRÉAL ET ARRONDISSEMENTS DE LA VILLE DE MONTRÉAL DEPUIS LA RÉORGANISATION TERRITORIALE DE 2006



Source : Statistique Canada, Recensement de 2016.

Réalisation : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic-Cartierville	6 Le Sud-Ouest	11 Saint-Laurent
2 Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce	7 Mercier-Hochelaga-Maisonneuve	12 Saint-Léonard
3 Lachine	8 Pierrefonds-Roxboro	13 Verdun
4 LaSalle	9 Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles	14 Ville-Marie
5 Le Plateau-Mont-Royal	10 Rosemont-La-Petite-Patrie	15 Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension

Figure 1.1 Limites géographiques du territoire d'étude

1.7. PERTINENCE ET APPORTS DE L'ÉTUDE

Notre étude s'inscrit dans la lignée des travaux portant sur l'équité environnementale et la végétation urbaine. Toutefois, cette étude propose de raffiner le diagnostic de l'équité

environnementale, et ce, de trois façons. Premièrement, la mesure des SE pour les différents secteurs de la ville nous permet de dépasser la simple évaluation de la distribution de la végétation. En effet, elle donne plus de précision sur l'accès aux bénéfices de la végétation — auparavant, restreint à la distribution des végétaux sur le territoire — par la mesure de ceux-ci. Or, à notre connaissance, il n'existe pas d'études sur l'équité environnementale portant sur l'accès aux SE des arbres de rue à Montréal ou ailleurs en Amérique du Nord.

Deuxièmement, l'existence d'une base de données (un inventaire des arbres publics réalisé par la Ville de Montréal entre 1989 et 2013) comprenant les caractéristiques de chaque arbre rend possible le calcul de leurs SE. Dans les recherches antérieures sur la forêt urbaine de Montréal, les images satellites à haute définition constituaient l'outil d'analyse (Apparicio *et al.*, 2013, 2016; Pham *et al.*, 2011, 2012, 2013). Cette méthode permet de prendre connaissance du couvert végétal et même de la canopée en distinguant les arbres des arbustes et de la pelouse. Par contre, elle ne pourrait pas servir à un calcul des SE suffisamment précis. Effectivement, les quantités de SE diffèrent selon le niveau de maturité de l'arbre, ses conditions de vie, sa santé (maladie, parasite) et les caractéristiques propres à son essence (dimension et perméabilité de la couronne, taille, système racinaire, qualité d'absorption et de séquestration). Ainsi, le nombre d'arbres n'est pas un bon indice pour quantifier les SE. La canopée en est un indicateur supérieur, mais on lui préfère les caractéristiques individuelles des arbres parce qu'ils donnent des estimations plus rigoureuses (Aguaron et McPherson, 2012). Cela étant dit, les services écologiques mesurés se limiteront aux arbres excluant, alors, les autres types de végétaux (herbe, plante, arbuste, algue et champignon).

Aussi, notre étude mobilisant des analyses spatiales a un apport méthodologique important, car, d'une part, il propose d'évaluer la qualité de l'environnement d'une façon plus précise. Certains experts et certaines villes ont formulé le désir d'accéder à une évaluation métrique des SE — des arbres urbains particulièrement dans le cas de la *San Francisco's Urban Forest Map* (Friends of the Urban Forest et City of San Francisco, 2017) — afin qu'elle

puisse être utilisée par les acteurs de la planification urbaine comme les urbanistes et les ingénieurs (voir Section 2.4) (Matthews *et al.*, 2015 dans Bissonnette *et al.*, 2018; Bissonnette *et al.*, 2018; Friends of the Urban Forest et City of San Francisco, 2017; Levrel *et al.*, 2017). Les résultats obtenus profiteront à la poursuite des recherches en environnement, en justice environnementale et en santé publique. D'autre part, il offre d'évaluer l'équité environnementale en utilisant l'accès aux différents bénéfices de la végétation plutôt que le simple accès à la végétation. Par conséquent, nous décomposerons en dix variables l'accès à la végétation.

Les précisions métriques que nous apporterons aux connaissances établies puis nos constats se répercuteront particulièrement sur les recherches montréalaises. Néanmoins, ils influenceront celles d'autres villes et, pour lors, d'autres contextes urbains. Ainsi, notre étude permettra de faire des recommandations aux instances publiques afin d'améliorer la santé publique ainsi que la résilience aux changements climatiques et aux aléas anthropiques à Montréal comme ailleurs.

1.8. CONCLUSION

En somme, les enjeux environnementaux et d'équité environnementale guettent le bien-être de la population urbaine. Les arbres participent grandement à leur apaisement lorsqu'ils sont présents et non menacés. Le contexte montréalais nous laisse présager que certains groupes de population sont plus susceptibles d'avoir un accès restreint aux arbres (publics) de rue dans leur milieu résidentiel et, conséquemment, aux SE. De surcroît, l'atteinte d'une canopée couvrant 25 % du territoire de la Ville de Montréal permettrait, à cette dernière, d'assurer la santé de sa population et de ses écosystèmes. La canopée protégerait cette santé en réduisant la chaleur urbaine, les surverses et les besoins en infrastructures « dures » de gestion d'eau, en améliorant la qualité de l'air et en diminuant des impacts des ravages de l'agrile du frêne. Dans une perspective plus large, notre recherche offre une mesure plus détaillée que ces prédécesseurs des bénéfices des arbres publics montréalais et, conséquemment, de la qualité de l'environnement et de l'accès à ces derniers. Ces précisions

sont susceptibles d'avoir des répercussions sur les futures études dans le domaine, particulièrement celles sur Montréal, et la planification du verdissement de cette ville. Nous développons aussi une approche permettant d'identifier des zones prioritaires à être verdies, et ce, en fonction des SE existants, des besoins de la population et des besoins environnementaux. Cette approche se veut exploratoire, en étant flexible et modulable selon les besoins locaux et spécifiques de chaque municipalité. Ainsi nous espérons de contribuer au Plan d'action Canopée de la ville.

2. CHAPITRE II CADRE CONCEPTUEL

2.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, sont exposés les concepts clés qui encadrent le projet, soit les services écologiques (SE), l'équité environnementale et la planification de plantation d'arbres basée sur les besoins. Dans un premier temps, j'aborde les SE des arbres de rue urbains dans leur ensemble. Ensuite, je discute, plus précisément, des SE mesurables, puis des SE non mesurables et, enfin, des SE retenus pour la présente étude. Dans un second temps, je présente le concept d'équité environnementale, notamment dans l'accès à la végétation urbaine, ainsi que les causes qui le sous-tendent. Dans un troisième temps, j'explique le lien entre les SE des arbres urbains et l'équité environnementale dans cette étude. Le schéma ci-dessous illustre les liens entre les SE et les besoins lors de la planification de plantation (dont l'équité environnementale), mais, aussi, l'orientation de notre recherche et les indicateurs qui s'y rapportent.

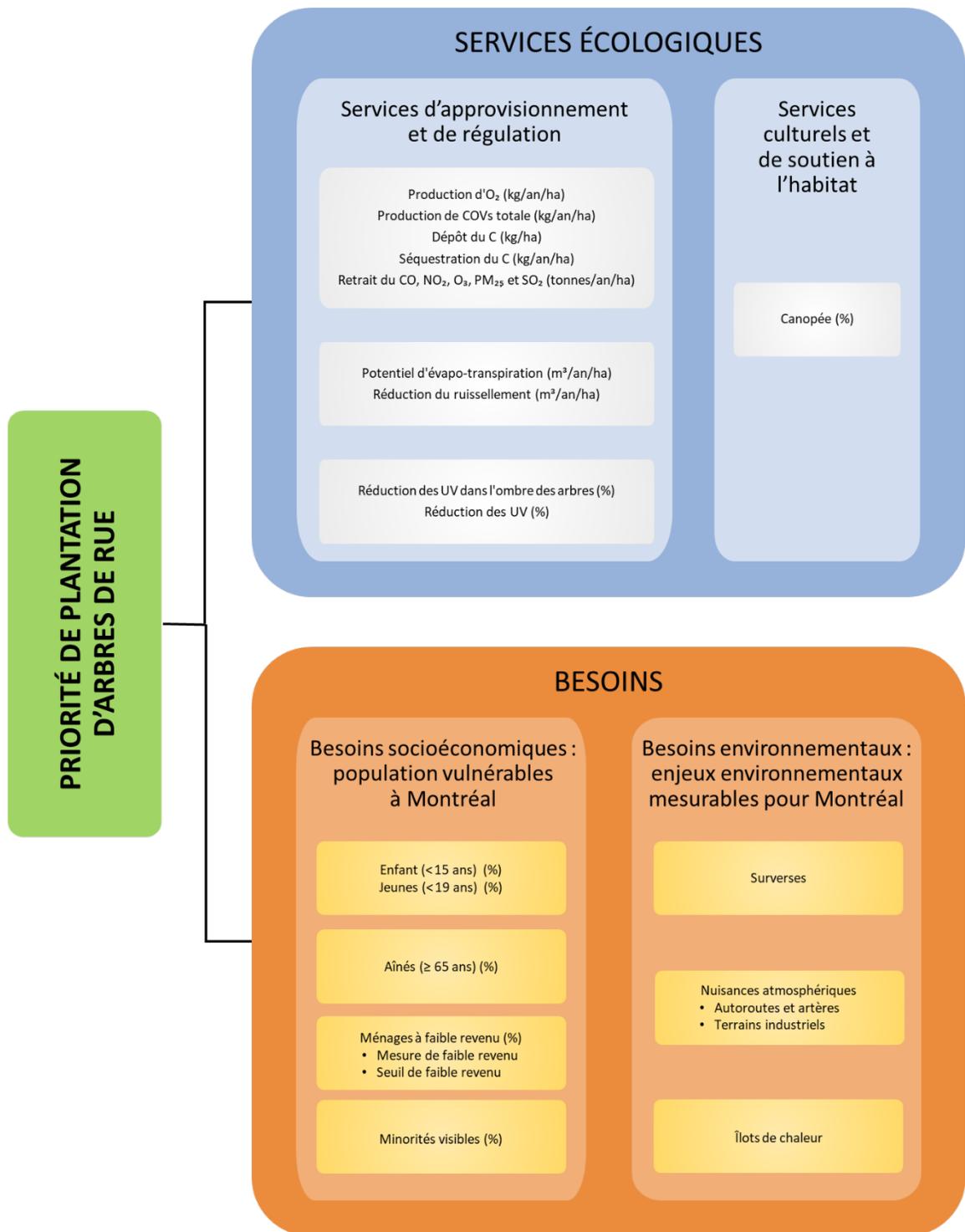


Figure 2.1 Schéma synthétique de la méthodologie

2.2. SERVICES ÉCOLOGIQUES DES ARBRES URBAINS

2.2.1. Définition

Les services écologiques (SE) en français ou écosystémiques en anglais désignent « the benefits that can be delivered by nature and the implications of these benefits on human wellbeing » (Dobbs *et al.*, 2014, p. 1). Ils sont définis de façon plus ou moins approfondie et selon différentes dimensions dépendamment des auteurs. Ce n'est pas étonnant puisque, plus particulièrement dans le cas des arbres, les « [e]cosystem services by definition are human-centered, so different perceptions and attitudes of humans determine the type and level of benefits they receive from trees » d'après Flocks *et al.* (2011, p. 127).

Nous adoptons une définition des SE en son sens le plus large, soit celle qui est proposée par le MEA (2003). Les SE ou bénéfiques tirés des écosystèmes peuvent être séparés en quatre groupes :

- i) les services de prélèvement aussi dit d'approvisionnement (aliments sauvages, approvisionnement en eau douce potable, matériel génétique);
- ii) les services de régulation (régulation de la qualité de l'air, du climat, du ruissellement, de la qualité de l'eau, des maladies, de la présence d'organisme nuisible et de la pollinisation) et
- iii) les services culturels (patrimoine, esthétique, éducation, etc.)
- iv) les services de soutien à l'habitat également nommés les services d'auto-entretien, qui sont nécessaires à l'obtention des autres services; (MEA, 2003; Preston et Raudsepp-Hearne, 2017) (voir l'Appendice A).

De plus, les auteurs du MEA distinguent deux types de « facteurs et éléments constitutifs du bien-être » humain produits par les SE. Le premier groupe comprend les facteurs et éléments qui affectent indirectement le bien-être humain, soit la biodiversité, la désertification, les

possibilités et les défis des entreprises et des industries ainsi que les zones humides. Le deuxième groupe comprend la sécurité, la santé, les bonnes relations sociales et les éléments essentiels pour une vie agréable, soient des bénéfices de la végétation directement liés aux humains qui découlent des précédents SE.

Plus particulièrement concernant les arbres du milieu urbain, pour Flocks *et al.* (2011), les SE des arbres du milieu urbain ne sont pas toujours mesurables et comptabilisables. Les éléments faisant partie du deuxième groupe tels les services culturels ainsi que certains des facteurs constitutifs du bien-être (la sécurité, les bonnes relations sociales et les éléments essentiels pour une vie agréable) sont évacués de la présente étude parce qu'ils sont trop relatifs pour être comptabilisés jusqu'à maintenant du moins. À l'inverse, les services de prélèvement — aussi appelés services d'approvisionnement par Preston et Raudsepp-Hearne (2017) — et de régulation ainsi que la santé sont mesurables et, donc, calculés dans plusieurs études empiriques (Alam *et al.*, 2016; Dobbs *et al.*, 2014; Flocks *et al.*, 2011; Levrel *et al.*, 2017; Locke *et al.*, 2010; Martínez Gaete, 2016; McPherson *et al.*, 1997; Meerow et Newell, 2017; Morani *et al.*, 2011; Na *et al.*, 2014; Nowak et Crane, 2002; Nowak *et al.*, 2013, 2014, 2018; Pui *et al.*, 2014). Dans le cadre de ce mémoire, seuls les services mesurables sont retenus.

Parmi les SE mesurables et retenus dans les études empiriques, nous trouvons trois sous-catégories : les bénéfices sociaux, économiques et environnementaux. On entend par les SE sociaux les bienfaits pour la population, par exemple, sur la santé physique, le niveau de stress, la socialisation, les habiletés cognitives. Selon Flocks *et al.* (2011), les SE économiques sont l'augmentation des valeurs foncières et la diminution des besoins énergétiques des bâtiments. Ces derniers auteurs réduisent les SE environnementaux à leurs bénéfices les plus souvent mentionnés dans la littérature soit la fraîcheur, la création de microclimats ainsi que la réduction du ruissellement et de l'érosion.

De leur côté, les concepteurs du logiciel *i-Tree*, le logiciel le plus utilisé pour évaluer les SE des arbres, ont retenu des SE mesurables et portant sur les aspects environnementaux et économiques tels que définis par Flocks *et al.* (2011). Par exemple, on compte l'élimination

et le stockage du carbone trouvé dans l'air, la prévention des glissements de terrain, la réduction des besoins énergétiques des bâtiments et les *tree bioemissions*. Dans ce mémoire, nous adoptons le classement des SE proposé par le MEA (2003) brillamment synthétisé et adapté à la recherche par Preston et Raudsepp-Hearne (2017). Dans les prochaines sections, les services que nous procurent les arbres urbains sont expliqués en détail. La liste des SE retenus pour la présente étude est, ensuite, présentée.

2.2.2. Services mesurables

2.2.2.1. Services d'approvisionnement

Plus particulièrement en milieu urbain, le SE d'approvisionnement en aliments (sauvages) peut se mesurer d'après les opportunités économiques qui en découlent, la présence d'arbres fruitiers, l'accès aux aliments sauvages pour l'humain et pour le reste de la faune ainsi que selon la quantité d'aliments sauvages récoltés et la part du régime alimentaire de la population qu'elle représente (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). L'approvisionnement en eau douce potable est, en partie, possible grâce à la purification de l'eau par les arbres. La filtration naturelle de l'eau rend service aux sociétés humaines en diminuant les coûts (\$) d'épuration de l'eau lorsque son écosystème est dégradé. Ce SE se calcule en soustrayant la part de l'eau traitée par les arbres urbains (million de m³) de la quantité d'eau nécessaire à l'approvisionnement de la ville puis en rapportant ce résultat en coût d'épuration d'eau économisé (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). L'approvisionnement en eau douce potable est différencié de la régulation de la qualité de l'eau. Le premier SE concerne l'eau qui sera consommée. Le second, discuté dans la prochaine section (Section 2.2.2.2), aborde l'eau qui a été utilisée par les Hommes ou qui a été souillée au contact de leur environnement. Enfin, les arbres urbains représentent un vaste matériel génétique en raison de la multitude d'essences existantes qui assure la continuité de l'ensemble des SE.

2.2.2.2. Services de régulation

La seconde grande catégorie de SE offerte par les arbres en milieu urbain représente les services de régulation. Ils désignent « le résultat des processus et des fonctions

écosystémiques qui régulent tous les aspects de l'environnement et assurent les conditions de sécurité et d'habitat dont les humains ont besoin » (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). Les arbres urbains régulent la qualité de l'air, le climat, le ruissellement, la qualité de l'eau et les organismes nuisibles (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017).

Régulation du climat

La végétation permet de lutter contre les îlots de chaleur et l'exposition aux rayons UV. La canopée réduit la chaleur urbaine agissant comme barrière contre le rayonnement solaire. La canopée peut aussi réduire jusqu'à environ 75 % la part des rayons solaires atteignant le sol (Orlandini *et al.*, 2017). De ce fait, la canopée protège notre peau. Enfin, l'interception des rayons solaires par le couvert végétal freine le réchauffement des points d'eau qui amène à l'évaporation de l'eau qu'ils contiennent. Ainsi, la sécheresse est réduite et l'accès à l'eau est protégé. De plus, la fraîcheur, l'écoulement et le volume de l'eau évitent la prolifération de bactéries et ainsi de maladies hydriques (INSPQ, s. d. c).

Il existe deux façons de mesurer l'interception des rayons ultraviolets (UV). D'une part, la réduction de l'index d'UV (IUV) exprime la part des UV interceptée en pourcentage. D'autre part, le facteur de protection contre les rayons ultraviolets (FPU) est une valeur sans unité comparable au facteur de protection solaire (FPS) qui caractérise la force des écrans solaires (Na *et al.*, 2014). La méthode la plus courante est le calcul de l'IUV (*ibid.*). L'IUV est calculé à partir de l'ozone total, du rayonnement UV de surface, et de données spectrométriques (*ibid.*). La pondération arithmétique des rayons UV est une autre technique, mais elle est peu utilisée, car elle n'informe pas sur le niveau de danger sanitaire pour la population comparativement à l'IUV (*ibid.*). Ayant été développés au Canada, les niveaux de danger sanitaire de l'IUV sont adaptés aux peaux pâles, des peaux contenant moins de mélatines et, par conséquent, des risques de cancer plus élevés (Gies *et al.*, 2018). De plus, les risques sanitaires liés aux rayons UV devraient aussi tenir compte du temps d'exposition, un facteur difficile à utiliser toutefois (*ibid.*).

Régulation de la qualité de l'air

Parmi les polluants mentionnés, le NO₂, le O₃, le SO₂ et les PM_{2,5} sont d'importants indicateurs pour mesurer la régulation de la qualité de l'air par les arbres de rue. La régulation de la qualité de l'air est assurée par les feuilles et épines des végétaux qui absorbent ou forment une surface de dépôt pour les polluants atmosphériques. Pour trouver la quantité de polluants qu'une forêt urbaine peut séquestrer, certaines données sont essentielles : l'indice de surface foliaire, la vitesse de dépôt des polluants sur les feuilles des arbres urbains (Hirabayashi *et al.*, 2015; Preston et Raudsepp-Hearne, 2017) et la concentration de polluant dans l'air (Hirabayashi *et al.*, 2015).

L'indice de surface foliaire est l'aire qu'occuperait la surface de l'ensemble des feuilles d'un arbre si celles-ci étaient étalées sur le sol sans se juxtaposer. Toutefois, Nowak *et al.* (2013) et Nowak *et al.* (2018) calculent un indice de surface foliaire à partir de la canopée (obtenue par photo-interprétation) qui est l'aire totale formée par la couronne (de feuilles) de chaque arbre sur un site. Par contre, il est possible d'être plus précis en tenant compte de l'essence de l'arbre.

Pour quantifier le service de régulation de la qualité de l'air, il faut estimer la quantité de personnes affectées par une mauvaise qualité de l'air. D'une part, il est possible de prédire les secteurs où ses risques sanitaires sont plus élevés en utilisant la quantité de polluants séquestrée par la végétation pour une même aire dans les différentes zones d'un territoire. D'autre part, Preston et Raudsepp-Hearne (2017) proposent de simplement regarder le nombre de personnes exposées à un air en dessus des seuils de pollution recommandés (notamment par l'OMS). Cela est possible en multipliant la qualité de l'air pour chaque unité géographique à l'intérieur d'une ville par son nombre d'habitants.

Utilisant une approche économique pour mesurer ce SE, Nowak *et al.* (2014) attribuent une valeur monétaire au service de régulation de la qualité de l'air par les arbres, en se basant sur les frais de santé, la perte de productivité et, en cas de décès, la valeur statistique d'une vie humaine. La valeur monétaire calculée par tonne de chacun des polluants retirés est multipliée par les différentes densités de population des entités spatiales ciblées par leur

étude. Une instance publique québécoise a développé un outil similaire, le Air Quality Benefits Assessment Tool (AQBAT). L'AQBAT répond sensiblement la même question de Nowak *et al.* (2014) mais à l'envers : quel est le coût de la pollution atmosphérique? Les résultats de Nowak *et al.* (2014) nous poussent à croire que les arbres de rue peuvent diminuer cette facture.

Régulation de la qualité de l'eau

La régulation de la qualité de l'eau par les arbres est évaluée selon l'efficacité du retrait de la charge ou de la concentration, soit la capacité d'absorption (par exemple, kg/ha/an) des matières organiques, des polluants ou des nutriments (Lachapelle-Trouillard, 2017). Elle peut, aussi, inversement, être mesurée d'après la teneur des polluants dans la biomasse de l'arbre (*ibid.*). Les tests d'efficacité sont réalisés en utilisant différent(e)s essences d'arbre, types de sol et types d'effluent. Les effluents peuvent être divers types d'eaux usées, de biosolides (boues) ou de lixiviat⁴ (*ibid.*).

Ce SE est souvent calculé en termes monétaires aussi. Plus spécifiquement, une valeur monétaire est attribuée à la régulation de la qualité de l'eau grâce à la réduction des coûts de traitement en raison de la réduction du volume d'eau à traiter. En second lieu, lorsqu'une plantation est utilisée comme centre d'épuration, c'est-à-dire quand elle est irriguée par des eaux grises, on peut calculer les économies effectuées sur l'épargne en fertilisant pour la croissance des arbres et au faible coût de traitement des eaux usées (*ibid.*). Cette technique a été développée pour pallier l'absence de système de nitrification, de dénitrification et de déphosphatation (*ibid.*). Finalement, ce SE pourrait être estimé par l'incidence des maladies hydriques — par exemple, le nombre de cas ou les coûts de traitement (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017) et du ruissellement.

⁴ « Le lixiviat est le liquide résiduel engendré par la percolation de l'eau et des liquides à travers une zone de stockage de déchets, de produits chimiques ou tout simplement un sol contaminé par des polluants. » Futura planète (s. d.)

Régulation du ruissellement

Il existe aussi plusieurs méthodes pour quantifier la régulation de ruissellement. Selon nous, la régulation du ruissellement par la végétation et les sols perméables est préférablement évaluée par la quantité d'eau entrant dans les égouts pluviaux ou par la contribution du ruissellement au volume d'eau dans les égouts combinés (voir Section 2.4.2 : « Identification des besoins et des zones de plantation prioritaires »). Cela s'explique par le fait que la réduction du ruissellement pourrait réduire la saturation des égouts (Moreira et Boudreault, 2012). Il est aussi possible d'utiliser l'incidence ou les risques d'inondation (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). Enfin, la mesure et l'attribution d'une valeur monétaire à la réduction du volume d'eau à traiter sont des indicateurs de la régulation de la qualité de l'eau et du ruissellement par la végétation et les sols perméables.

Régulation des organismes nuisibles

La régulation des organismes nuisibles (par exemple, agrile du frêne, longicorne asiatique et punaise marbrée) est mesurable, d'une part, selon les dommages potentiels à la forêt. D'autre part, ce SE peut être mesuré par l'identification de chaque arbre présentant des symptômes (*i-Tree*, 2017b). Nous supposons que le nombre de parasites présents dans une forêt peut aussi être un indicateur de la régulation des organismes nuisibles. Ce service peut être évalué sous une perspective inverse en estimant les besoins en lutte biologique et les pertes agricoles causées par un ou des ravageurs (MDDELCC, s. d.; Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). Les indicateurs pour cette catégorie et leur méthode de calcul ne seront pas plus approfondis, car la présente recherche ne l'étudie pas pour des raisons de temps et de concision des résultats et de leur analyse.

2.2.3. Services difficilement mesurables

Services culturels

Nous avons divisé les services culturels en trois ensembles. Un premier ensemble des services culturels porte sur l'identité d'un individu ou d'un groupe d'individus. Il comprend l'« identité

culturelle et [le] patrimoine », le « sentiment d'appartenance à un lieu » ainsi que la « spiritualité et [la] religion » (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017).

Un deuxième ensemble est composé des services culturels portant sur le bien-être et l'éducation. Selon Preston et Raudsepp-Hearne (2017), la présence de végétation encourage le « développement cognitif [ainsi que la] santé et [le] bien-être psychologiques et physiques ». Cela se rapporte au « potentiel récréatif » de Dobbs *et al.* (2014) sur lequel nous revenons au paragraphe suivant. Preston et Raudsepp-Hearne (2017) disent, aussi, que la présence de végétation soutient des « systèmes de connaissance et [l']éducation » ainsi qu'une « expérience esthétique ».

Un troisième ensemble se rapporte aux bénéfices économiques potentiels qui ne sont pas liés à la satisfaction de besoins vitaux ou à la santé contrairement aux SE d'approvisionnement ou de régulation abordés plus tôt. Il s'agit d'abord de l'inspiration pour la pensée et le travail créatifs humains de Preston et Raudsepp-Hearne (2017) qui peut être relié au concept d'attractivité de la ville de Schroeder et Anderson (1984). De plus, selon Preston et Raudsepp-Hearne (2017), la présence de végétation est favorable au développement des domaines économiques de l'écotourisme et du loisir (récréatif). Dobbs *et al.* (2014) réfèrent indirectement au secteur économique du loisir lorsqu'ils développent puis calculent le SE intitulé *recreational potential* (littéralement « potentiel récréatif ») en se basant sur la superficie de zone végétalisée par habitant. Le « potentiel récréatif » se rapporte aux « vegetated areas that provide space for physical and psychological enjoyment » (Dobbs *et al.*, 2014). Notons que Levrel *et al.* (2017) analysent les « services récréatifs » (*recreational services*) sans y attribuer de valeur monétaire. Ils mesurent ces services par l'accès aux espaces verts et « bleus », soit aux plans d'eau.

Services de soutien à l'habitat

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons préféré utiliser la dénomination proposée par Preston et Raudsepp-Hearne (2017), *services de soutien à l'habitat*, car elle rend davantage compte du SE de cet ensemble qui tente d'être mesuré, l'habitat. Ils comprennent la

formation du sol, la production primaire, le cycle des éléments nutritifs, le cycle de l'eau et l'habitat (*ibid.*). Le SE à l'habitat réfère à la structure de la végétation dont fait partie la biodiversité et à la prestation d'habitat (*ibid.*) aussi nommée *habitat potential* (potentiel d'habitation pour la faune) par Dobbs *et al.* (2014) ou *wildlife suitability* dans le logiciel *i-Tree* (US Forest Service (USFS), 2005-2016).

Ces auteurs utilisent la connectivité des espaces verts comme unique variable chargée de représenter l'*habitat potential* des animaux (Dobbs *et al.*, 2014). L'*habitat potential* de Dobbs *et al.* (2014) est calculé à partir de la connectivité des zones végétalisées de plus de 120 m (zone non végétalisée à 60 m du *core habitat*) dont l'intersection est d'une aire plus large que 1,44 ha.

2.2.4. SE retenus

Notre recherche s'attardera aux SE mesurables (Figure 2.2) pour trois raisons. Premièrement, le calcul des SE mesurables permettrait d'évaluer la valeur monétaire des SE à partir des résultats de notre étude. Déjà en 1958, on savait que l'évaluation monétaire sensibiliserait davantage les décideurs à l'environnement (Odums et Hoskin, 1958 dans Serpantié *et al.*, 2012). De plus, cela favorisera l'institutionnalisation des SE, un processus amorcé par le MEA (2003). Effectivement, le MEA a amené une dimension politique aux SE en se proposant comme un guide pour les dirigeants de toutes les nations. Deuxièmement, bien que nous n'étudions pas en profondeur les bénéfices sociaux des SE, nous estimerons où ils sont susceptibles d'avoir le plus d'impacts en comparant nos résultats à la localisation des lieux concentrant des populations vulnérables. Effectivement, il ne nous est pas possible de donner un diagnostic riche des bénéfices sociaux ou culturels de la végétation ou, encore, de son soutien à l'habitat pour la faune, car nous n'avons que la présence de canopée (%) pour en rendre compte. Troisièmement, notre recherche a pour objectif de mieux orienter les politiques publiques arboricoles afin de prioriser les zones défavorisées sur le plan de la végétation en termes de quantité et d'équité. Cela n'est possible qu'en exposant la situation actuelle des SE pour l'ensemble de la ville. Notre sélection de SE est basée sur la faisabilité des calculs (permise par les logiciels disponibles, notamment *i-Tree*), la disponibilité de

données et l'utilité des calculs. La liste des SE retenus est présentée à la Figure 2.2. Les données existantes sur la végétation pour la Ville de Montréal nous permettent de calculer les SE des arbres de rue.

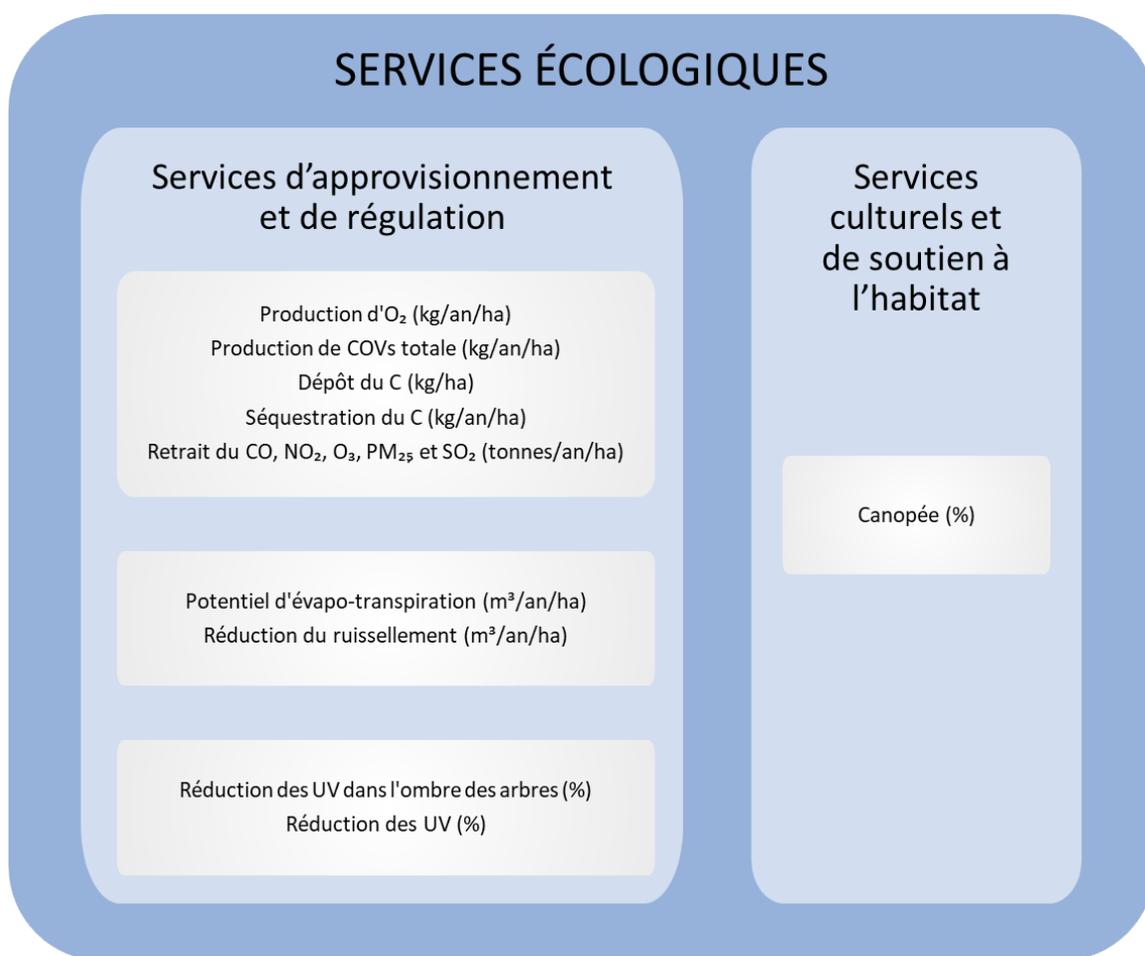


Figure 2.2 Schéma des services écologiques retenus

Nous avons exclu la biodiversité pour trois raisons. D'une part, « [l]a biodiversité soutient la capacité des écosystèmes à produire des SE et contribue à leur qualité, mais la biodiversité n'est pas un SE et n'est pas équivalente à un SE. » (Preston et Raudsepp-Hearne, 2017). D'autre part, l'étude de la biodiversité ne se réduit pas au nombre d'essences sur un territoire donné. En effet, la mesure de la qualité de chaque essence et la condition des arbres y

prennent part (voir Flocks *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2010). L'évaluation de la qualité de la végétation nous semblerait trop biaisée sans ces données.

Nous avons aussi écarté le potentiel d'habitation pour la faune tel que défini et mesuré par Dobbs *et al.* (2014) ainsi que le potentiel récréatif (Dobbs *et al.*, 2014), car l'évaluation de ces SE consisteraient une recherche à part entière. Notre outil de mesure, le logiciel *i-Tree Eco version 6*, ne calcule pas le premier d'une façon assez rigoureuse (voir Section 6.4.9) et ne calcule pas le second.

Dans la section subséquente, nous voyons les relations entre la végétation ou les arbres et la population humaine, comment elles sont évaluées et la pertinence de leur étude. Nous nous focalisons sur les groupes de population ayant davantage besoin de la végétation (dont des arbres) selon la littérature.

2.3. JUSTICE ENVIRONNEMENTALE, ÉQUITÉ ENVIRONNEMENTALE ET ÉQUITÉ COMPENSATOIRE

2.3.1. Définition

Le deuxième concept clé de cette étude est l'équité environnementale qui fait partie d'un concept plus large, soit la justice environnementale. Cette dernière comprend trois dimensions : la justice distributionnelle (équité environnementale), la justice procédurale et la justice comme reconnaissance (Walker, 2012). Bien que les trois formes de justice environnementale soient distinctes selon Walker (2012), il précise qu'elles sont profondément liées.

Le concept d'équité environnementale du milieu urbain compte deux thématiques. D'une part, le thème des nuisances environnementales se traduit par la localisation (Boone *et al.*, 2009), les risques et la présence des lieux pollués et des activités polluantes de l'échelle mondiale (Blanchon *et al.*, 2009) à celle municipale (Carrier, 2015). Ces éléments dépendent du besoin des ménages (Carrier, 2015; Frank *et al.*, 2003) ainsi que du cumul de « la discrimination face au logement, [de] la pauvreté et [de] l'économie de marché. » (V.

Been, 1994, p. 1406 dans Blanchon *et al.*, 2009, p. 53; Carrier, 2015). De plus, Carrier (2015) apporte qu'il y a iniquité lorsqu'un groupe de population est surreprésenté près de nuisances. D'autre part, l'équité environnementale porte sur la présence et l'accès aux commodités environnementales (Boone *et al.*, 2009) comme les parcs, les aires protégées et les ressources, et ce, autant sur le plan de l'équité verticale (intergénérationnelle) qu'horizontale (entre et dans les sociétés pour une même époque) (Blanchon *et al.*, 2009).

L'équité environnementale diffère de l'équité compensatoire en prônant l'accès égal pour l'ensemble des membres d'une population à une ressource, un bien ou un service plutôt que la satisfaction égale dans son accès variable selon le besoin de chacun d'eux (Crompton et Wicks, 1988). L'équité compensatoire, quant à elle, vise à compenser par des services publics les groupes de population désavantagés (par exemple, les personnes à faible revenu) afin de répondre à leurs besoins qui sont plus grands puis, ultimement, d'égaliser les opportunités à travers une population (*ibid.*).

2.3.2. Le cas montréalais

Des études précédentes sur l'équité environnementale et la végétation urbaine à Montréal démontrent que certains groupes sont sous-représentés dans les quartiers verdoyants — ce qui traduit une forme d'iniquité environnementale — alors que d'autres groupes y sont surreprésentés. Plus spécifiquement, Apparicio *et al.* (2016) prouvent que le pourcentage de minorités visibles a une faible association positive et significative ($p = 0,05$) avec les arbres et les arbustes, publics comme privés dans leur îlot de résidence, mais négativement significative à 250 m de celui-ci. Pham *et al.* (2012) constatent que les minorités visibles ont une faible relation positive avec les arbres et les arbustes en cour arrière, mais, là encore, négative avec la végétation à l'échelle de l'îlot. Cela insinue que les minorités visibles verdissent leur terrain de résidence, mais qu'ils habitent dans des secteurs défavorisés en matière de végétation publique. Cela peut s'expliquer par des penchants culturels. Par exemple, les immigrants d'origine méditerranéenne ont tendance à faire de l'agriculture urbaine (Routaboule, Anselin et Eveillard, 1995 dans Pham *et al.*, 2012). À Montréal, les

immigrants récents italiens cultivent plus de plantes ornementales et potagères en plus de planter davantage d'arbres fruitiers que l'ensemble de la population.

Apparicio *et al.* (2016) rapportent aussi une association positive entre la présence d'arbres et d'arbustes et les enfants ainsi que les aînés dans une moindre mesure. À l'inverse, une iniquité environnementale est soulevée par la relation négative entre la présence d'arbres et d'arbustes et les personnes à faible revenu (Apparicio *et al.*, 2016).

Ces disparités s'expliquent par le fait que le couvert d'arbres de rue varie en fonction de la forme urbaine, du profil de la population et des politiques en gestion forestière du milieu municipal (Apparicio *et al.*, 2016; Limoges, 2017; Pham *et al.*, 2017; Pham *et al.*, 2013; Pham *et al.*, 2012). Plus spécifiquement, sur le territoire de l'ancienne Ville de Montréal, la densité de population est un important facteur explicatif de la présence de pelouse, mais elle n'a pas de lien significatif avec la présence d'arbres ou d'arbustes (Pham *et al.*, 2013). L'âge des bâtiments, le pourcentage des résidents détenant un diplôme universitaire, la densité de population puis la présence de maisons détachées et de duplex augmentent les chances d'avoir plus d'arbres et d'arbustes le long des rues à l'échelle de l'aire de diffusion (*ibid.*). À l'inverse, la présence d'immigrants récents, l'âge des bâtiments au carré et la présence d'immeubles résidentiels de 5 étages et plus diminuent ces chances (*ibid.*). L'étude de Pham *et al.* (2013) démontre aussi que la présence de locataires, le revenu médian, la part du territoire occupé par les parcs et la distance au centre-ville des affaires (CBD) ne sont pas des facteurs significatifs de la présence d'arbres et d'arbustes aux abords des rues (*ibid.*). La somme de ces résultats de Pham *et al.* (2013) nous pousse à croire que les politiques de verdissement municipales sont des prédicteurs de la canopée, mais bien moins importants que les facteurs socioéconomiques (Collin et Robertson, 2005 dans Pham *et al.*, 2013).

L'ensemble de ces résultats peut induire que la présence d'arbres de rue a aussi une relation avec la mobilisation et la revendication auprès des instances publiques par la population. D'une part, on peut supposer que les résidents plus instruits ayant choisi de vivre dans des quartiers denses sont favorables à la végétation, mais n'ont pas l'espace nécessaire sur la portion avant de leur terrain pour accueillir un arbre. Alors, ils demandent aux acteurs publics

de planter des arbres sur l'emprise viaire. D'autre part, les ménages à faible revenu et les acteurs publics des quartiers où ces ménages sont surreprésentés investissent moins dans la plantation et l'entretien d'arbres par limitations financières ou par manque d'intérêt (Grey et Deneke, 1986 dans Limoges, 2017; Perkins et al., 2004 dans Pham *et al.*, 2012). Notons que les ménages à faible revenu sont fréquemment constitués de minorités visibles qui sont, à leur tour, majoritairement des immigrants récents (Pham *et al.*, 2012). Ainsi, nous avons pour hypothèses que les immigrants récents désirent, eux aussi, avoir plus de végétation, mais qu'ils n'ont pas l'aisance linguistique et ont moins de temps d'en faire la requête, car ils se soucient de besoins plus primaires (Perkins et al., 2004 dans Pham et al., 2012; Pham *et al.*, 2012; Germain et al., 2007 dans Pilon, 2015a). Ensemble, les découvertes présentées démontrent que la présence et la taille (DHP et canopée) des arbres de rue sont complexes à expliquer par des modèles statistiques.

Il existe peut-être d'autres causes sous-tendant une telle iniquité à Montréal. Premièrement, la discrimination actuelle peut rendre l'achat ou la location d'un logement plus difficiles pour certains groupes de population (Boone *et al.*, 2009; Perkins et al., 2004 dans Pham *et al.*, 2012). Deuxièmement, dans le passé, cette discrimination a été mise en œuvre par des formes urbaines ségrégatives (Boone *et al.*, 2009). Autrement dit, le tissu urbain dans certaines villes américaines a parfois été volontairement construit en séparant les groupes ethnoculturels ou les classes sociales. Le zonage, l'homogénéité des constructions résidentielles et des fonctions ainsi que la localisation des lieux d'emplois et des structures institutionnelles sont aussi responsables d'une ségrégation involontaire (Boone *et al.*, 2009; McNicoll, 1993 et Boudjikianian, 2006 dans Pilon, 2015a; Pilon, 2015a). Troisièmement, les quartiers verdoyants ont des valeurs foncières plus élevées ce qui rend leur accès plus difficile pour les ménages à faible revenu (Boone *et al.*, 2009; Pham *et al.*, 2012). Quatrièmement, la présence des organismes à but non lucratif (OBNL) pourrait avoir un impact sur la localisation des espaces verts (Pincetl, 2003 dans Boone *et al.*, 2009). En effet, Pincetl (2003) avance que les OBNL de Los Angeles sont devenus, dans les années 1960, d'importants acteurs d'assignation des utilisations du sol en raison du support que le gouvernement leur a offert pour pallier son manque d'implication dans l'amélioration de la qualité de vie.

Cinquièmement, la localisation des minorités visibles dans des secteurs moins verts peut s'expliquer par un plus grand nombre de facteurs culturels influençant leur choix de localisation résidentielle. Certains groupes ethnoculturels préfèrent se regrouper ou résider près de leur famille. Par contre, la connaissance du quartier et de résidents du même groupe ethnoculturel surpasse le désir de proximité à la famille (McNicoll, 1993 dans Pilon, 2015a). Nous avons vu que la distribution des institutions publiques influence la localisation des différents groupes de population. Pour les immigrants, les lieux de culte, les centres communautaires et, surtout, des établissements scolaires sont des facteurs de localisation résidentielle importants. Les établissements scolaires, particulièrement les écoles primaires, sont associés à une langue et, parfois, à une religion ce qui en faisait un facteur important de localisation des immigrants qui persiste aujourd'hui pour les raisons précédemment évoquées (McNicoll, 1993 dans Pilon, 2015a). Cela explique en partie la distribution des minorités visibles, car ils ont plus de chances d'être des immigrants.

Toujours à Montréal, l'équité compensatoire soulève principalement des questionnements concernant la localisation des écoles et l'accès à la végétation chez les ménages à faibles revenus (Carrier *et al.*, 2014; Pham *et al.*, 2012). Les écoles des quartiers défavorisés ont tendance à se situer dans un environnement où la concentration en NO₂ est estimée supérieure et, moins significativement, à être entourées de plus de kilomètres de voies de transport majeures (longueur des artères, des routes collectrices et des voies rapides) outre les autoroutes, une importante source de pollution (Carrier *et al.*, 2014). Cela constitue une iniquité environnementale et aussi une iniquité compensatoire puisque les enfants sont physiologiquement plus vulnérables à la pollution atmosphérique et parce que les ménages à faible revenu ont un moindre accès à la végétation comme vu plus tôt. Selon Pham *et al.* (2012), en raison des associations négatives entre ce groupe de population et la végétation privée comme publique illustrées plus tôt, les parts du territoire couvertes par la canopée publique ou par la végétation publique devraient être supérieures à celle de l'ensemble de la ville dans les secteurs où résident les plus fortes proportions des ménages à faible revenu. Cela les compenserait, entre autres, en SE de réduction de la chaleur urbaine puisque leur

moyen financier restreint leur capacité à climatiser leur logement ou à se déplacer vers des espaces verts, soit des zones plus fraîches [Inspiré de Pham *et al.*, 2012].

2.3.3. Éléments retenus dans l'évaluation de l'équité environnementale

Notre étude porte, dans un premier temps, sur l'équité distributionnelle et plus précisément sur la présence et l'accès aux commodités environnementales. Nous nous intéressons aux trois composantes de la présence et de l'accès aux commodités environnementales (la quantité d'espaces verts ou de végétation, la qualité de la végétation et l'équité) ainsi qu'à chacun de leurs indicateurs présentés dans le schéma à la Section 2.2.4.

Dans un second temps, notre recherche concerne l'équité compensatoire, car nous nous intéressons à la surreprésentation des groupes de population vulnérables dans les secteurs moins desservis en SE. En effet, nous désirons trouver les zones sensibles pour influencer les programmes de verdissement.

Dans un troisième temps, les nuisances environnementales (terrains industriels, autoroutes et artères) sont traitées par leur inclusion dans nos indices composites n° 2 (besoins socioéconomiques et environnementaux) et n° 3 (priorité de plantation). Ces indices composites enrichissent l'étude de l'équité compensatoire par l'ajout de la vulnérabilité du territoire et par la vulnérabilité de la population.

2.4. CONCEPTUALISER LA PLANIFICATION DE LA PLANTATION D'ARBRES SELON LES BESOINS ET LA CANOPÉE EXISTANTE

2.4.1. Liens entre les SE et les besoins

La forêt urbaine est vue comme une infrastructure verte (Meerow et Newell, 2017), car elle nous procure plusieurs SE, comme nous l'avons montré au Chapitre 1 et au début de ce chapitre. À l'heure actuelle, introduire plus d'infrastructures vertes dans la Région métropolitaine de Montréal nécessite des outils de production de savoir et de

planification (Bissonnette *et al.*, 2018). Les séances de réflexion menées auprès d'un groupe de chercheurs universitaires et de 70 participants du *Sommet sur les infrastructures naturelles du Grand Montréal* de 2016 ont conclu que la production de savoir doit passer par une amélioration de l'inventaire des SE, de l'estimation de leur valeur socioéconomique et des indicateurs de performance des infrastructures vertes. La majorité d'entre eux pensent qu'il faut planter, sans plus tarder, des infrastructures vertes malgré le manque de savoir dans ce domaine (*ibid.*).

La création d'infrastructures vertes et l'utilisation du concept de SE dans la planification sont entravées par la difficulté de leur intégration dans le système de planification, sous forme d'outils de planification et sur le terrain (Bissonnette *et al.*, 2018; Levrel *et al.*, 2017). Toutefois, la plantation d'arbres est une mesure traditionnelle d'implantation d'infrastructures vertes et est la moins controversée puisqu'elle ne requiert pas d'espace additionnel dédié aux espaces verts ou à leur réseau (trame verte, connectivité des espaces verts) [Notre traduction de Di Marino et Lapintie, 2017, p. 145]. Ainsi, d'ici à l'institutionnalisation des pratiques permettant de favoriser l'implantation d'infrastructures vertes (Bissonnette *et al.*, 2018), la plantation d'arbres reste la mesure la plus simple et évidente d'augmenter les SE. Dans cette optique, la prochaine partie du cadre conceptuel de la présente étude (Section 2.4.2) se consacre à l'élaboration d'un outil d'identification des zones prioritaires de plantation d'arbres se basant sur les SE et sur les besoins.

Les campagnes de plantation d'arbres de rue s'attaquent-ils aux sites où les SE ajoutés seraient les plus nécessaires [Inspiré de Meerow et Newell, 2017] ? C'est ce que nous tentons de vérifier grâce à la création d'un indice composite combinant SE et besoins. Nos indices composites constituent un outil susceptible de s'avérer très utile pour un organisme ou un planificateur urbain. Ils pourraient aussi être adaptés en fonction de leurs objectifs. Par exemple, l'urbaniste d'un arrondissement particulièrement touché par le phénomène de surverse pourrait donner une valeur supérieure aux SE qui y sont liés, soit le potentiel d'évapotranspiration et la réduction du ruissellement. Ainsi, nous nous penchons sur les zones en besoin, sur les zones où les bénéfices de la plantation d'arbres rempliraient les divers

objectifs de différentes organisations (Locke et al., 2010) ou, encore, sur les points chauds (Meerow et Newell, 2017). Les points chauds sont des agrégats spatiaux de valeurs fortes. Dans la présente recherche, ils désigneront les regroupements de secteurs de recensement cumulant les besoins selon plusieurs indicateurs. Que ce soit les infrastructures vertes ou plus particulièrement les sites de plantation de nouveaux arbres, plusieurs auteurs s'entendent sur l'idée que leur localisation devrait être orientée là où les besoins sont les plus criants (Bissonnette *et al.*, 2018; Locke *et al.*, 2010; Meerow et Newell, 2017).

2.4.2. Identification des besoins et des zones de plantation prioritaires

L'identification des zones prioritaires de plantation d'arbres nécessite la création d'indices composites pour plusieurs raisons. D'une part, les SE sont souvent inter-corrélés (voir Section 4.8). L'évaluation de l'abondance de SE peut se réduire à l'analyse d'un indice composite qui représente la variation statistique et spatiale de leur ensemble. Similairement, les variables socioéconomiques et démographiques peuvent, elles aussi, être mieux représentées à l'aide d'un indice composite. D'autre part, le recours aux indices composites nous permet de synthétiser et de spatialiser les SE ainsi que les besoins à travers la ville. Une évaluation spatiale fine des SE et des besoins en résulte puisque chaque indice est exprimé à l'échelle des secteurs de recensement. En somme, la combinaison des deux premiers indices nous permet de cartographier des zones prioritaires de plantation d'arbres (Indice composite n° 3).

Les zones de plantations prioritaires sont identifiées de différentes manières dans la littérature. Les études en équité environnementale utilisent habituellement, soit la distribution des SE, soit celle des nuisances comme base d'information dans la création de leur indice composite. Ce choix dépend des données disponibles et du temps imparti à la création de celles-ci. Dans cette étude, nous utilisons les SE.

Des besoins socioéconomiques

Concernant les besoins sociaux, les études sur les besoins en plantation ont recours à une multitude de facteurs pour introduire une dimension sociale. Par exemple, Morani *et al.* (2011) utilisent la densité de population. Flocks *et al.* (2011) emploient le pourcentage de locataires. Locke *et al.* (2010) recourent au revenu, à la criminalité ainsi qu'aux fréquences de différentes maladies et d'habitudes de vie nocives. Meerow et Newell (2017) se servent du *Social Vulnerability Index for the United States (SoVI)* dans sa version 2010-2014 créé par la *Hazards and Vulnerability Research Institute* de l'Université de la Caroline du Sud (Meerow et Newell, 2017). Il compare 27 indicateurs démographiques ou économiques à l'échelle des secteurs de recensement à Détroit. Parmi ces variables, 8 expliquent 78 % de la variance entre les secteurs de recensement états-uniens, qui représentent la santé; l'appartenance ethnoculturelle et le statut social; les d'aînés; l'appartenance au groupe ethnoculturel hispanophone et le fait de ne pas avoir d'assurance maladie; les besoins sanitaires individuels particuliers; l'emploi dans l'industrie du service; l'appartenance au groupe ethnoculturel autochtone et, enfin, le genre [Notre traduction de l'Université de la Caroline du Sud, 2013]. Enfin, la dimension sociale chez (Carrier *et al.*, 2016a) est incarnée par la présence des groupes de populations vulnérables soit les enfants, les aînés, les personnes à faible revenu et les minorités visibles dans le cas de Montréal.

Des besoins environnementaux

À propos des besoins environnementaux, on retrouve habituellement trois groupes de besoins. Le premier groupe repose sur les besoins relatifs à la chaleur urbaine, au rayonnement solaire et, surtout, à la qualité de l'air (Carrier *et al.*, 2016a; Friends of the Urban Forest et City of San Francisco, 2017; Locke *et al.*, 2010; Meerow et Newell, 2017). La qualité de l'air est discutée sous l'angle des sources de pollution (Carrier *et al.*, 2016a; Locke *et al.*, 2010), de la concentration des polluants (Morani *et al.*, 2011) ou du retrait, de la séquestration et du dépôt des polluants (Friends of the Urban Forest et City of San Francisco, 2017). Les sources de pollution sont analysées selon la densité (Locke *et al.*, 2010) ou la proximité (Carrier *et al.*, 2016a) aux artères et aux autoroutes. En plus de la modélisation du

retrait, de la séquestration et du dépôt des polluants, des chercheurs modélisent aussi la dispersion, la production ou la concentration de polluant (par exemple, Hirabayashi *et al.*, 2015; Nowak *et al.*, 2013; Weber et Phillips, 2004).

Le deuxième groupe des besoins environnementaux contient des variables liées à la structure spatiale des espaces ouverts verts. Locke *et al.* (2010) se penchent sur la biodiversité dans la création d'un sous-indice avec les densités des corridors écologiques⁵ et des habitats fauniques existants. Meerow et Newell (2017) calculent aussi la connectivité des espaces verts (*landscape connectivity*) ou plutôt des forêts urbaines de Détroit. Il est intéressant de mentionner que la variable de connectivité de chacune des deux études précédentes sert à localiser les grandes zones de végétation existantes pour les agrandir. Cela peut s'expliquer par le fait que les forêts de moins de 1,5 h ont bien moins de diversité génétique et biologique (d'essences) que celle de 35 à 40 h, un seuil au-delà duquel la diversité ne croît plus avec la taille de la forêt (Padoa-Schioppa et Canedoli, 2017).

Le troisième groupe comprend des variables liées à la réduction du ruissellement malgré que ce dernier ne soit pas le plus présent dans la littérature. Cela est certainement dû à l'accès aux données. Une difficulté que Locke *et al.* (2010), les auteurs de *San Francisco's Urban Forest Map* (Friends of the Urban Forest et City of San Francisco, 2017) ainsi que Meerow et Newell (2017) surmontent en utilisant, respectivement, la densité d'inondations; la réduction du ruissellement par les arbres⁶; un indice de gestion des eaux de pluie composé d'une estimation du ruissellement puis de l'existence d'une décharge et du volume d'eaux usées qu'elle rejette.

Il est à noter que certaines recherches utilisent des indicateurs qui leur sont uniques. Par exemple, Meerow et Newell (2017) comparent la localisation des zones de plantation prioritaires qu'ils ont identifiées avec les projets actuels d'infrastructures vertes en voie

⁵ Un corridor écologique est une série d'espaces verts connectés.

⁶ La *San Francisco's Urban Forest Map* (Friends of the Urban Forest et City of San Francisco, 2017) discute plutôt de la quantité d'eau filtrée par les arbres, car leur perspective est monétaire, mais cela équivaut à la réduction du ruissellement dans une perspective plus large.

d'implantation sur leur territoire d'étude. Il est aussi à noter que plusieurs études incluent l'espace disponible pour la plantation. Flocks *et al.* (2011) utilisent l'aire potentielle de plantation et la *San Francisco's Urban Forest Map* (Friends of the Urban Forest et City of San Francisco, 2017) se sert de la localisation des sites vacants tandis que Locke *et al.* (2010) emploient les sites les plus appropriés aux différents objectifs de divers organismes.

Standardisation et pondération lors de la création des indices composites

Dans les études en sciences sociales sur l'environnement, les indices composites sont réalisés par *score-z* ou par la méthode *min-max* (Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), 2008). Les variables sont, alors, soient centrées-réduites (moyenne = 0, variance =1), soit normalisées (minimum = 0, maximum = 1) (*ibid.*). La variance de l'indice composite est la seule différence entre les deux méthodes. Les valeurs d'un *score-z* oscillent entre la valeur négative et la valeur positive du cumul des écarts-types (*ibid.*) des variables. Celles de la méthode *min-max* varient potentiellement de 0 au nombre de variables qui composent l'indice composite. Par conséquent, il est souvent plus facile d'analyser les résultats de la méthode *min-max* que celle basée sur les *scores-z*.

Quant à la pondération des variables, autant d'études semblent donner le même poids à toutes les variables que ceux qui donnent des poids différents aux variables pour créer un indicateur. Carrier *et al.* (2016a) ont pondéré également l'ensemble de leurs indicateurs. Morani *et al.* (2011) attribuaient une plus grande importance à son indicateur de pollution qu'à la densité de population et qu'à la canopée. Par contre, Meerow et Newell (2017) pondèrent les déciles de leurs six indicateurs nommés « *ecosystem benefit criteria* » selon l'importance que leur attribuent les acteurs approchés. Parallèlement, ils proposent aussi une pondération selon les paires. D'ailleurs, Locke *et al.* (2010) utilisent ces deux méthodes dans une même étude.

2.5. CONCLUSION

Les informations exposées dans ce chapitre ont ciblé les SE, les éléments d'évaluation de l'équité environnementale et des besoins (socioéconomiques et environnementaux) propices au cas montréalais. Nous y exposons aussi rapidement la littérature sur les méthodes permettant de synthétiser l'ensemble de nos indicateurs en un même outil de planification (pour identifier des zones de plantation prioritaires à Montréal). Dans le chapitre subséquent, l'opérationnalisation de ces concepts est présentée puis mise à profit dans la création de trois indices composites.

3. CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE

3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, la méthodologie employée pour répondre aux trois questions de recherche est présentée. D'abord, les unités d'analyses sont définies. Ensuite, sont décrites les données utilisées (notamment celles permettant de calculer les SE) ainsi que la construction de trois indices composites : un premier pour les SE, un second pour les besoins et un dernier combinant les deux premiers. Ce dernier indice permet alors d'identifier les zones de plantation prioritaires. La figure ci-dessous résume les différentes étapes de notre méthodologie présentées dans ce chapitre.

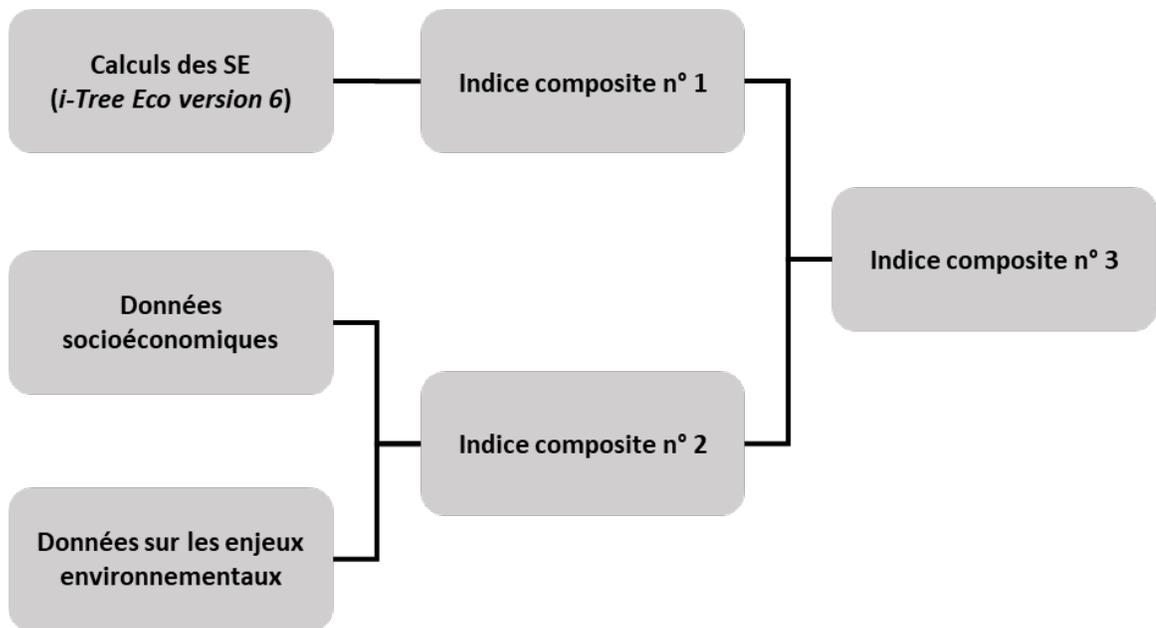


Figure 3.1 Schéma résumant la méthodologie

3.2. UNITÉS D'ANALYSE DE L'ÉTUDE

Notre objectif est de calculer les SE suivants, par secteur de recensement :

- le pourcentage de rayons UV interceptés;
- le pourcentage de la superficie du secteur de recensement couverte par la canopée;
- la quantité en m³ d'eau et
- la quantité en kg de particules de C, de CO, de NO₂, d'O₃, de PM_{2,5} et de SO₂.

Cela n'empêche pas que certains résultats seront interprétés subjectivement, car il n'existe pas de barèmes permettant de comparer les performances écologiques des villes. Signalons, d'emblée, que les secteurs de recensement (de 2500 à 8000 habitants, en moyenne 4000 habitants) (Statistique Canada, 2018) proviennent des *Fichiers des limites des secteurs de recensement, Année de recensement 2016* de Statistique Canada. Il est à noter que d'autres unités géographiques auraient pu être utilisées comme l'aire de dissémination ou l'îlot urbain. Par contre, l'entrée manuelle des identifiants et de la taille des unités géographiques imposée par le logiciel *i-Tree Eco version 6* nous a contraint à l'usage des secteurs de recensement.

3.3. DONNÉES UTILISÉES

Dans cette section, nous détaillons, dans un premier temps, la provenance et la nature des données nécessaires à l'utilisation du logiciel *i-Tree Eco* nous permettant de calculer les SE. Dans un second temps, nous décrivons les variables et données extraites du recensement de 2016 utilisées pour poser un diagnostic d'équité environnementale pour les quatre groupes retenus (enfants, personnes âgées, minorités visibles et personnes à faible revenu).

3.3.1. Données des arbres publics de la Ville de Montréal, 1989 à 2013

Nous utilisons, comme base de données, le *Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal* aussi nommé *Arbre de rue et hors rue* du Service des grands parcs, du verdissement et du Mont-Royal de la Ville de Montréal monté entre 1989 et 2013 dont la dernière modification annuelle date de décembre 2016 (Ville de Montréal, Service des

grands parcs, du verdissement et du Mont-Royal, 2016). Comme son titre l'indique, cette base de données répertorie les arbres publics qu'ils soient sur les emprises publiques le long des rues ou dans les parcs pour les limites géographiques de la Ville de Montréal suite à la réorganisation territoriale de 2006. Les données dans cette base sont nombreuses, soit : les arbres de rue ou de parc (champ *Invent*), le nom de l'arrondissement auquel l'arbre appartient, ses coordonnées géographiques (champs *Coord_X* et *Coord_Y*), le sigle de son essence (champ *Sigle*), le nom de son essence en latin, en anglais et en français (champs *Essence_Ang*, *Essence_Fr* et *Essence_Latin*), le diamètre de son tronc à la hauteur de la poitrine (champ *DHP*) en centimètre⁷ et la présence d'obstacle à sa croissance (champ *Obstacle*). Il est à noter que nous avons dû corriger plusieurs noms d'essences des arbres afin qu'ils correspondent à ceux utilisés par le logiciel *i-Tree* (voir la Section 7.1.3 de l'*Annexe A*).

3.3.2. Données sur l'utilisation de sol de la Communauté métropolitaine de Montréal, 2016

Pour obtenir la fonction des lots, nous avons pris la base de données *Utilisation du sol 2016* de la Communauté métropolitaine de Montréal (Communauté métropolitaine de Montréal (CMM), 2016). Nous en avons retenu l'utilisation du sol et le positionnement géographique des entités (terrains). Ces informations nous permettent d'attribuer aux arbres de rue la fonction du terrain le plus proche afin d'enrichir le calcul de la séquestration du carbone. Dans le logiciel *i-Tree Eco version 6*, la *SéqC* des arbres sur des terrains vacants ou humides est multipliée par 1 alors que celle sur les terrains servant aux autres fonctions est multipliée par 0,8 (Henning, 2017), car les arbres auraient une croissance plus lente dans le second groupe d'utilisations du sol.

Pour ce faire, nous avons procédé à la conversion des catégories d'utilisation du sol de la Ville de Montréal pour qu'elles répondent à celles employées par *i-Tree Eco version 6*. Le Tableau 3.1 résume les transformations apportées à la classification de l'utilisation du sol de la base de données des arbres publics de la Ville de Montréal après les corrections suivantes.

⁷ Mesuré à 1,4 m du plus haut niveau du sol.

Au préalable, des corrections ont été apportées aux utilisations du sol de la base de données de la Communauté métropolitaine de Montréal pour corriger, uniformiser ou se conformer aux recommandations des développeurs d'*i-Tree Eco*. Premièrement, nous avons corrigé et actualisé l'usage des lots de la catégorie *utilité publique*, car la majorité d'entre eux n'appartenaient plus à la Ville de Montréal et étaient désormais utilisés pour des activités commerciales ou industrielles. Cela a été réalisé par des vérifications avec des photographies des lots obtenus en 2017 sur Google Street View. Les terrains de fonction *Utilité publique* mis en vente ont été classés comme étant commercial/industriel (C). Deuxièmement, certains terrains vacants (code 900 dans la base de données) sont corrigés et transformés pour en tirer le meilleur usage pour *i-Tree Eco version 6*. Par exemple, les jardins communautaires sur des terrains dits vacants (V) se sont vu attribuer le code des parcs (600, P). Troisièmement, la catégorie d'usage du sol attribué aux casernes de pompiers, aux garages de la Société de transport de Montréal (STM) et aux stations d'autocars ou d'autobus est unifiée sous la catégorie *Utilitaire* (U). Quatrièmement, certains lots avec les utilisations du sol *bureau*, *cimetière* et *institutionnel* ont aussi été corrigés : certains lots classés comme bureaux sont en fait des stationnements, quelques cimetières étaient classés comme parc, certains lots de bâtiments institutionnels correspondaient plutôt à la couverture végétale d'un parc.

Tableau 3.1 Transformation des catégories d'utilisation du sol de la Ville de Montréal pour les conformer à celles du logiciel *i-Tree Eco version 6*

Communauté métropolitaine de Montréal	→	<i>i-Tree Eco version 6</i>
800 : agricole	→	Agriculture (A)
Cimetières (classés 600, 510 ou 520)	→	Cemetery (E)
200, 400 et 300 : commerciale, industrielle et de bureau	→	Commercial/industrial (C)
1100 : Golf	→	Golf course (G)
500 (510 et 520 à l'exception des cimetières) : institutionnelle	→	Institutional (I)
102, 103, 104, 112, 113 et 114 : résidentielle à plus d'un logement	→	Multi-family résidentiel (M)

600 : Parc ou espace vert	→	Park (P)
101 : résidentielle d'un logement	→	Residential (R)
710, 720, 725, 750 et 760 : zone ferroviaire, zone aéroportuaire, stationnement et rue ou ruelle	→	Transportation (T)
700 : d'utilité publique	→	Utility (U)
900 : Sans utilisation (vacant)	→	Vacant (V)
1000 : Hydrographie	→	Water/wetland (W)
—		Other (O)

Crédit : Auteure, 2018. Sources des données : CMM, 2016; *i-Tree*, 2017a.

3.3.3. Données météorologiques et sur la pollution de l'air

Le logiciel *i-Tree Eco version 6* doit également utiliser des données météorologiques pour calculer les indicateurs relatifs à la séquestration des polluants atmosphériques et à l'hydrologie (potentiel d'évaporation, potentiel de transpiration, évaporation, transpiration, interception des précipitations et régulation du ruissellement). *i-Tree Eco version 6* utilise des données de 2010 du *National Air Pollution Surveillance (NAPS)* (Environnement Canada, 2015 dans Hirabayashi, 2016) pour la pollution atmosphérique, de 2005 à 2013 du *National Climatic Data Center (NCDC)* (NCDC, 2015 dans Hirabayashi, 2016) pour les données météorologiques de surface et de 2013 du *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* (NOAA, 2015 dans Hirabayashi, 2016) pour les données des radiosondes (*upper air*).

La station météorologique choisie est celle de l'aéroport Pierre-Elliott-Trudeau, soit la seule sur l'île ou dans la Ville de Montréal. Les données de pollution utilisées ne sont pas très récentes (2010), mais elles étaient les seules mises à disposition par la *NAPS* lors de l'inclusion du Canada parmi les pays d'étude couverts par le logiciel en 2016. De 2011 à 2013, la *NAPS* n'avait pas publié de nouvelles données ce qui a empêché les développeurs du logiciel *i-Tree Eco version 6* d'utiliser des données plus récentes. « Les données manquantes ont été linéairement interpolées en utilisant les données existantes tout juste avant et après la donnée manquante. » [Notre traduction de la Section 4.2.6 de Hirabayashi, 2016].

Les données de température de surface sont celles du *NCDC* de 2005 à 2013. Ce sont des données prises aux heures qui sont désagrégées pour obtenir des données horaires. Les données météorologiques canadiennes de 2010 du *NCDC* (*NCDC*, 2015 dans Hirabayashi, 2016) ont servi au calcul des émissions biogéniques des composés organiques volatils (COVs).

3.3.4. Données sociodémographiques de Statistique Canada, 2016

Plusieurs données ont été extraites du recensement de 2016 au niveau des secteurs de recensement (N = 420) de notre territoire d'étude (Statistique Canada, 2017b) afin de construire les quatre variables suivantes : 1) le pourcentage d'enfants de moins de 15 ans dans la population totale; 2) le pourcentage de personnes de 65 ans et plus dans la population totale; 3) le pourcentage de personnes dans les ménages sous la mesure de faible revenu après impôt dans la population totale et 4) le pourcentage de personnes ayant déclaré appartenir à une minorité visible dans la population totale.

Nous avons privilégié la *mesure de faible revenu* (MFR) au lieu du *seuil de faible revenu* (SFR). La MFR est le revenu médian des ménages après impôt ajusté selon le nombre de membres qu'ils contiennent (Statistique Canada, 2017a). Il est à noter que la corrélation entre les deux mesures pour les 420 secteurs de recensement est très élevée ($R^2 = 0,959$).

3.3.5. Données sur les enjeux environnementaux de la Ville de Montréal

Le choix des données et de la présence d'enjeux environnementaux qu'elles représentent ont été déterminés selon leur disponibilité pour le territoire d'étude et leur affiliation aux SE étudiés qui correspondent le mieux à leur atténuation. Ainsi, les problèmes environnementaux retenus sont les surverses, des nuisances environnementales et les îlots de chaleur.

Ouvrages de surverses

L'enjeu des débordements d'égouts lors des averses peut être spatialisé à l'aide de la localisation des ouvrages de surverses présents sur le territoire à l'étude. Les « ouvrages de surverses » aussi appelés « ouvrages de débordement » sont des réservoirs souterrains dirigeant les eaux grises (contenant les eaux usées et les eaux de pluie) dans le réseau d'égouts vers la station d'épuration (Ville de Montréal, 2016). Le jeu de données de 2016 titré *Ouvrages de surverses* produit par la Ville de Montréal est disponible gratuitement sur le *Portail données ouvertes* de la Ville de Montréal. Seuls les entités (les ouvrages, variable *ID_ouvrage*) et leur positionnement géographique (variables *Trop-Plein X* et *Trop-Plein Y*) ont été conservés et intégrés dans un système d'information géographique (SIG) afin de calculer le nombre d'ouvrages de surverses par secteur de recensement.

Îlots de chaleur

Pour la localisation des îlots de chaleur, nous nous servons de la base de données *Îlots de chaleur (2011)* du Collectif de recherche sur les îlots de chaleur disponible sur le *Portail données ouvertes* de la Ville de Montréal. Ses données traitées et diffusées en 2017 ont été produites à partir de la température de surface de 2011 de l'Agglomération de Montréal (Collectif de recherche sur les îlots de chaleur, 2011). Nous en utilisons les polygones qui délimitent les îlots de chaleur sur le territoire d'étude (voir la Figure 8.1 à l'*Annexe B*).

Nuisance environnementale : autoroutes et artères

Afin d'obtenir les tracés des autoroutes et des artères du réseau routier du territoire d'étude, les entités ayant pour attribut « 6 » (artères secondaires), « 7 » (artères principales) ou « 8 » (autoroutes) du champ *Classe*, sont extraits de la base de données *Géobase — réseau routier* du *Portail données ouvertes* de la Ville de Montréal. Nous avons aussi pris la longueur de ces entités (champ *Shape_Length*) et leur positionnement géographique dans cette base. Cette dernière a été créée en 2013 (Ville de Montréal, 2013-2017) puis mise à jour jusqu'en 2017 lors de sa consultation par notre équipe.

Nuisance environnementale : terrains industriels

Les données sur les terrains industriels proviennent de la base de données *Utilisation du sol* de la Communauté métropolitaine de Montréal datant de 2016 mentionnée à la Section 3.3.2. Les entités partageant l'attribut « 400 » (« Industrie ») pour le champ *Util_Sol* sont conservées ainsi que leur positionnement géographique.

3.4. CALCUL DES INDICATEURS DES SE, MESURES D'ÉQUITÉ ENVIRONNEMENTALE ET CONSTRUCTION DES INDICES COMPOSITES

3.4.1. Calculs des SE

Nous quantifions les SE afin de répondre à notre première question de recherche, à savoir :

Quelles sont les quantités de services écologiques produits par les arbres de rue à Montréal – en termes d'eau filtrée, d'air dépollué, d'oxygène produit, de rayons ultraviolets (UV) interceptés, de canopée – et quelles sont leurs variations spatiales à travers cette ville ?

Une fois la base de données finalisée, nous l'exploitons dans le logiciel *i-Tree Eco version 6* (USFS, 2005-2016). Cette application est un dérivé du logiciel *Urban FORest Effects (UFORE)* développé en 2005 par l'*US Forest Service (USFS)*. En 2010, l'USFS créa la série logicielle *i-Tree Tools* dans laquelle *UFORE* sera intégré et prendra le nom d'*i-Tree Eco*. Depuis cette date, la suite ne fait que s'enrichir et adopter de nouvelles plateformes. Ce logiciel permet de calculer les SE présentés à la Section 2.2.4 ainsi que la « wildlife suitability » discutée à la Section 2.2.3. La procédure de calcul que nous utilisons dans ce logiciel est présentée à l'*Annexe A*.

Ensuite, les statistiques descriptives de chacun des dix SE des secteurs de recensement des 15 arrondissements de la Ville de Montréal faisant partie de la zone d'étude sont produites pour être comparées entre elles. Ainsi, nous obtenons les indicateurs de SE suivants :

1. la production d'oxygène (*ProdO₂*, kg/an/ha)

2. le potentiel d'évapotranspiration (*PotEvapotr*, m³ d'eau/an/ha)
3. la réduction du ruissellement (*RéductRuiss*, m³ d'eau/an/ha)
4. la réduction des UV dans l'ombre des arbres (*UvOmbre*, %)
5. la réduction moyenne des UV sur le territoire (*UvMoyen*, %)
6. la production de composés organiques volatils totale (*ProdCOVs*, mise en négatif, kg/an/ha)
7. le dépôt du carbone (*DépôtC*, kg/ha)
8. la séquestration du carbone (*SéqC*, kg/an/ha)
9. le retrait du CO, du NO₂, de l'O₃, des PM_{2,5} et du SO₂ (*Retr5Poll*, kg/an/ha)
10. et la canopée (*Canopée*, %).

Il est à noter que le SE *UvMoyen* est obtenu à partir du SE *UvOmbre* et que ces deux indicateurs ont une corrélation quasi-parfaite ($R^2 = 0,99$).

3.4.2. Création de l'indice composite des SE (n° 1)

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant (voir Section 4.8), les dix SE sont fortement corrélées. Par conséquent, nous privilégions l'utilisation d'un indice composite des SE. Ainsi, l'Indice composite n° 1 est simplement la sommation des neuf SE par secteur de recensement préalablement ramenés sur une échelle de 0 à 1. Nous sommes neuf SE plutôt que dix, car nous avons retenu uniquement *UvOmbre* pour représenter l'interception des UV puisque le calcul d'*UvMoyen* en dépend entièrement (voir Section 6.2.3). Notre indice composite varie, donc, potentiellement de 0 à 9. Plus sa valeur est forte, plus les arbres de rue dans le secteur de recensement *i* fournissent des services écologiques (SE) élevés. Tel que signalé dans la revue de littérature, le recours à la méthode de normalisation *min-max* (Équation 1) est préférée à la standardisation par *score-z* (Équation 2), car son interprétation pour un cumul de variable est plus facile étant donné que chacune de leur valeur oscille de 0 à 1 plutôt que de part et d'autre de 0 sans minimum ou maximum fixes.

$$Norm_i = \frac{x_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad [1]$$

$$Zscore_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_X} \quad [2]$$

3.4.3. Diagnostic d'équité environnementale

Afin de répondre à notre deuxième question de recherche – certains groupes de population vulnérables ont-ils un accès nettement plus limité aux SE fournis par les arbres de rue –, nous réalisons une analyse bivariée. À partir d'une matrice de corrélation, nous pourrions explorer les associations entre les dix indicateurs de SE, l'indice composite des SE (n° 1) et les pourcentages des quatre groupes de population cibles par secteur de recensement (enfants, personnes âgées, personnes à la mesure de faible revenu et minorités visibles). Cela nous permettra de confirmer ou d'infirmer la présence de relations entre la quantité de SE et les différents groupes de populations vulnérables afin de poser un diagnostic d'équité environnementale.

3.4.4. Estimation des besoins socioéconomiques

Nous analysons les besoins socioéconomiques en SE à partir des pourcentages des quatre groupes de population vulnérables (enfants, aînés, personnes à faible revenu et minorités visibles) par secteur de recensement. D'emblée, les variables pour les enfants et les aînés ($P_{Enfants}$ et $P_{Aînés}$) sont ramenés sur une échelle de 0 à 1, soit les deux variables relatives à la vulnérabilité physiologique.

Quant à la vulnérabilité socioéconomique est reflétée par les pourcentages de personnes ayant déclaré appartenir aux minorités visibles et de celles dans les ménages à faible revenu selon la mesure de faible revenu. Toutefois, ces deux variables sont modérément corrélées ($R^2 = 0,48$). Par conséquent, nous avons préféré synthétiser ces deux variables à l'aide d'une analyse en composantes principales (ACP). Nous conservons ainsi uniquement le premier axe de l'ACP (valeur propre = 1,22; dénommée $ACP_{VulnSoEc}$ dans le reste du document) qui résume 74 % de la variance des deux variables. Le second axe résume seulement 26 % de la variance (valeur propre = 0,72). Les variables *pourcentages de personnes ayant déclaré appartenir aux minorités visibles* et *pourcentages de personnes ayant déclaré appartenir à un*

ménage à faible revenu selon la mesure de faible revenu contribuent respectivement à hauteur de 84,37 % et 15,63 % à la formation du premier axe. Globalement, plus la valeur de $ACP_{VulnSoEc}$ est forte, plus la vulnérabilité socioéconomique est élevée dans le secteur de recensement. Cette variable synthétique ($ACP_{VulnSoEc}$) est aussi ramenée sur une échelle de 0 à 1.

3.4.5. Estimation des besoins environnementaux

Les besoins environnementaux sont calculés à partir des trois bases de données de la Ville de Montréal représentant des enjeux environnementaux du territoire à l'étude.

Ouvrages de surverses

Premièrement, nous avons compté le nombre d'ouvrages de surverse par secteur de recensement. Deuxièmement, une correction manuelle est effectuée pour changer le nombre d'ouvrages de surverses du secteur de recensement 0285.00 (de 5 à 3), car il y a deux doublons d'ouvrages de surverses puisqu'ils ont deux émissaires (Ville de Montréal, 2016). Troisièmement, les nombres d'ouvrages de surverse par secteur de recensement sont normalisés sur une échelle de 0 à 1 (Équation 1).

Îlots de chaleur

À partir de la couche polygonale des îlots de chaleur, nous avons calculé, dans un SIG, la part de la superficie de chacun des 420 secteurs de recensement couverte par un ou plusieurs îlots de chaleur. Cet indicateur est aussi ramené sur une échelle de 0 à 1 (Équation 1).

Nuisances environnementales : terrains industriels, autoroutes et artères

À partir de la carte d'utilisation du sol, nous avons extrait les polygones de terrains industriels. Comme pour les îlots de chaleur, nous avons calculé la superficie de secteur de recensement couverte par des terrains industriels et transformée cet indicateur sur une échelle de 0 à 1 (Équation 1). Le même procédé est appliqué aux voies de transport majeures sans distinction pour leur classe (autoroutes, artères principales ou artères secondaires), mais en utilisant la longueur de leur tracé.

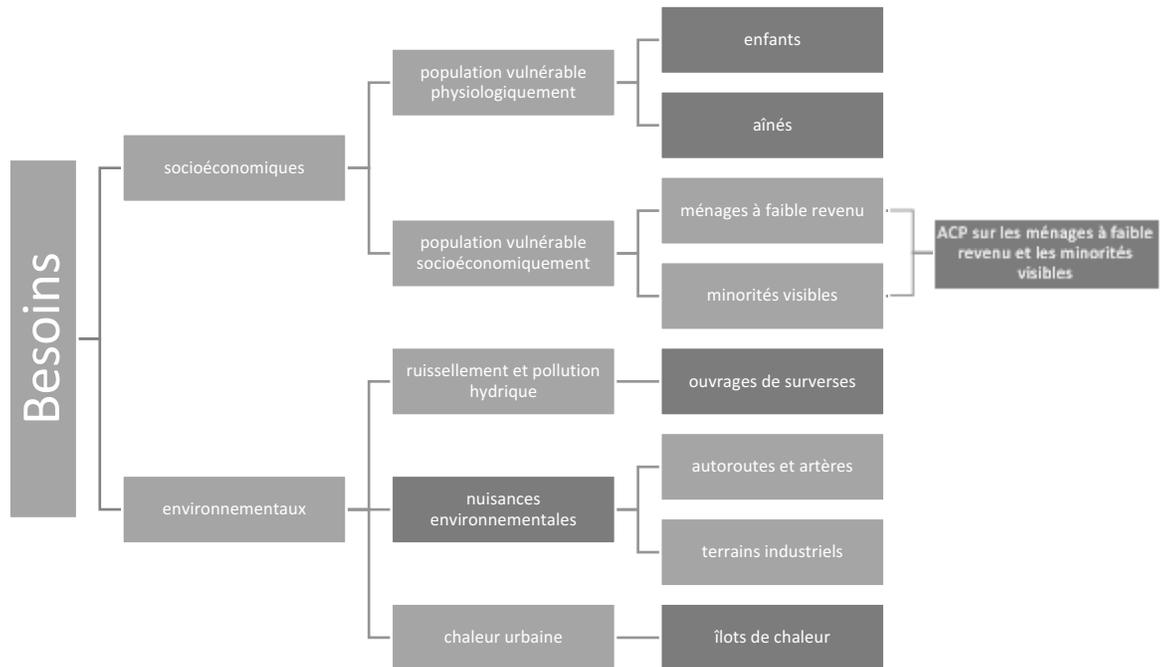
3.4.6. Création de l'indice composite des besoins (n° 2)

Le second indice composite représente la sommation des besoins en SE selon les six variables calculées ci-dessus (Équation 3) :

- le pourcentage d'enfants (échelle de 0 à 1);
- le pourcentage d'aînés (échelle de 0 à 1);
- l'indicateur de la population vulnérable socioéconomique issu de l'ACP (échelle de 0 à 1);
- la présence d'ouvrage(s) de surverse (échelle de 0 à 1);
- le pourcentage du secteur du recensement couvert par des îlots de chaleur (échelle de 0 à 1) et
- la présence de source(s) de nuisances (terrains industriels et axes routiers majeurs) (échelle de 0 à 1).

$$Indice_2 = P_{Enfants} + P_{Aînés} + coef\ ACP_{VulnSoEc} + P_{Surverse} + P_{SrcPoll} + P_{Chaleur} \quad [3]$$

Rappelons que nous avons choisi une pondération nulle, c'est-à-dire que les six variables ont un poids égal. Cela dit, cette pondération pourrait être adaptée au contexte spécifique du territoire, selon des évaluations des experts ou des professionnels en aménagement. Notre indice composite n° 2 varie potentiellement de 0 à 6. La construction de cet indice est résumée dans la Figure 3.2.



 = variables composant l'Indice composite n° 2 transformées sur une échelle de 0 à 1

Figure 3.2 Schéma des variables composant l'Indice composite n° 2

3.4.7. Création de l'indice composite des priorités de plantation (n° 3)

La création de l'Indice composite n° 3 sert à répondre à la dernière question de recherche :

Quelle serait l'utilité d'un indice composite propre à chaque arrondissement dans la planification de leurs interventions en regard de leurs besoins spécifiques qui sont déterminés par leurs conditions géographiques et naturelles ainsi que par leur profil démographique et socioéconomique ?

L'Indice composite n° 3 croise les données en cartographiant les quintiles du cumul des SE (l'Indice composite n° 1) avec les quintiles de l'indice composite n° 2, et ce, au niveau des secteurs de recensement. Sa construction se base donc sur les quintiles des deux indices. La construction de l'indice des zones de plantation prioritaires (schématisée à la Figure 3.3)

permet d'identifier 9 types de secteurs de recensement en fonction du croisement des deux indicateurs composites.

Par exemple, les types *A* et *B* regrouperont des secteurs de recensement caractérisés par des SE élevés (quintiles 4 ou 5 de l'indice 1) et peu de besoins socioéconomiques et environnementaux (quintiles 1 ou 2 de l'indice 2). À l'opposé, les types *I* et *H* sont caractérisés par un faible niveau de SE (quintiles 1 ou 2 de l'indice 1) et des besoins socioéconomiques et environnementaux élevés (quintiles 4 ou 5 de l'indice 2). Par conséquent, les secteurs des types *I* et *H* devraient être considérés comme des zones de plantation prioritaires.

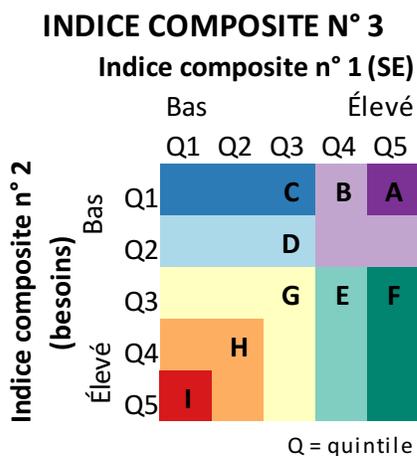


Figure 3.3 Schéma de la méthode et des variables composant l'Indice composite n° 3

La cartographie de ce dernier indice permet ainsi de localiser facilement les secteurs sensibles où l'attention des acteurs publics devrait être portée lors des futures campagnes de plantation d'arbres de rue. En d'autres termes, les interventions des instances publiques en urbanisme pourraient suivre l'ordre de gravité de la situation déterminé par cette analyse spatiale ($A > B > C > D > E > F > G > H > I$, niveaux de priorité *nulle* à *très élevée*).

3.5. CONCLUSION

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les données nécessaires et disponibles pour l'évaluation des neuf SE retenus, de l'équité (enfants, aînés, personnes dans les ménages à

faible revenu et minorités visibles) puis des besoins socioéconomiques (enfants, aînés et $ACP_{VulnSoEc}$) et environnementaux (surverses, îlots de chaleur et nuisance environnementale). Ensuite, nous avons vu comment ces données ont été synthétisées pour former trois indices composites (des SE, des besoins et des zones de plantation prioritaires). Les résultats de cette méthode sont présentés puis analysés dans le chapitre qui suit.

4. CHAPITRE IV : QUANTITÉ ET VARIATION SPATIALE DES SERVICES ÉCOLOGIQUES

4.1. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de répondre à notre première question de recherche portant sur l'évaluation et la distribution de services écologiques (SE) au sein de notre territoire d'étude. L'analyse des dix SE est réalisée pour deux découpages géographiques : pour les 15 arrondissements et les 420 secteurs de recensement. Pour chaque SE, nous discutons les résultats en lien avec des impacts sur la santé publique ou sur la gestion de l'eau. L'analyse de la part du territoire couvert par la canopée recevra une attention particulière, car la canopée est un indicateur facile à utiliser lors de la planification et des plans d'action de verdissement (voir le *Plan d'action canopée* de la Ville de Montréal, 2012). Aussi, nous prendrons soin de comparer nos résultats avec ceux d'une autre étude utilisant le même logiciel (*i-Tree Eco*), mais une méthode très différente pour estimer la canopée. Finalement, nous analyserons les associations entre les indicateurs des SE à partir d'une matrice de corrélation, puis nous présenterons l'indice composite des SE.

4.2. CANOPÉE ESTIMÉE

À partir des données introduites dans le logiciel *i-Tree Eco version 6*, la canopée des arbres de rue couvrirait 2,65 % du territoire d'étude⁸. Par contre, lorsqu'on regarde les statistiques par secteur de recensement, il y a de grands écarts entre les arrondissements (Tableau 4.1). Par exemple, les secteurs de recensement de Pierrefonds–Roxboro ont une très faible canopée

⁸ Nous avons obtenu ce résultat en divisant, par la taille (m²) du territoire d'étude, la somme des canopées (m²) de chaque secteur de recensement. En effet, les canopées (m²) des arbres sont sommées, par *i-Tree Eco version 6*, par couches géographiques (*strata*) entrées dans le logiciel. Nous avons utilisé les secteurs de recensement comme couche géographique.

de 0,26%, en moyenne, tandis que ceux de Rosemont–La Petite Patrie sont, en moyenne, couverts à 7,87% par la canopée des arbres de rue. Dans l'ensemble du territoire étudié, les secteurs de recensement sont couverts à 4,36% par la canopée en moyenne. Cela corrobore les résultats de Pham *et al.* (2013) qui ont calculé que la canopée des arbres de rue couvrait, en médiane, 5,45 % du territoire de 9 des 15 arrondissements de notre zone d'étude⁹.

Notre estimation de la canopée est probablement plus basse, car notre territoire d'étude inclut davantage de banlieues, où la végétation privée est plus importante que celle publique. À première vue, ces pourcentages peuvent sembler faibles. Toutefois, il convient de rappeler qu'ils excluent les arbres dans les parcs ou sur les terrains privés. En outre, le logiciel *i-Tree Eco* utilise une santé de la couronne de 87 % lorsque cette information ne lui est pas fournie. En effet, cette information ne figure pas parmi les caractéristiques recueillies sur chaque arbre dans le *Répertoire des arbres publics de la Ville de Montréal*. Finalement, les algorithmes utilisés par *i-Tree Eco* pour calculer la couronne à partir du DHP sont basés sur des arbres en milieu naturel plutôt que sur des arbres urbains, car la croissance des arbres en milieu urbain n'a pas suffisamment été étudiée. On sait que les forêts urbaines offrent plus d'espace de déploiement pour les couronnes que les forêts naturelles ou naturalisées qui sont plus denses et où les arbres poussent, alors, plus à la verticale (Aguaron et McPherson, 2012; Xiao, 1998 et Brack, 2002 dans Aguaron et McPherson, 2012). Il est, alors, possible que ce pourcentage soit sous-estimé.

⁹ Les arrondissements faisant partie du territoire d'étude de Pham *et al.* (2013) sont Ahuntsic–Cartierville, Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Mercier–Hochelaga–Maisonneuve, Le Plateau-Mont-Royal, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Rosemont–La-Petite-Patrie, Le Sud-Ouest, Ville-Marie et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension.

Tableau 4.1 Statistiques descriptives de l'estimation de la canopée (%) par secteur de recensement, dans les arrondissements et dans l'ensemble du territoire

Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	0,19	12,01	4,26	4,53	2,44
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	0,55	14,73	7,57	7,68	3,86
Lachine	0,03	4,99	0,68	1,50	1,65
LaSalle	1,04	6,62	2,56	3,04	1,57
Le Plateau-Mont-Royal	0,34	9,34	3,85	4,55	2,54
Le Sud-Ouest	0,24	9,72	3,37	4,19	2,46
Mercier–Hochelaga–Maisonnette	0,15	10,94	3,55	3,79	2,35
Pierrefonds–Roxboro	0,08	0,47	0,21	0,26	0,14
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	0,13	3,73	1,35	1,61	1,24
Rosemont–La-Petite-Patrie	1,58	16,76	7,81	7,87	3,42
Saint-Laurent	0,11	11,69	3,30	4,72	3,61
Saint-Léonard	0,93	5,01	2,36	2,67	1,20
Verdun	1,30	6,17	3,61	3,82	1,49
Ville-Marie	0,21	6,72	1,36	2,21	1,92
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	0,41	12,83	4,72	5,20	3,55
Ensemble du territoire	0,03	16,76	3,59	4,36	3,31

On observe que la part du secteur de recensement couvert par la canopée des arbres de rue peut être aussi faible que 0 % (Figure 4.1.) et que sa médiane n'est que de 4 % dans l'ensemble du territoire. Cependant, considérant que l'emprise du réseau viaire occupe 21,5 % du territoire¹⁰, on peut supposer que la canopée des arbres de rue voile 18,6 % de l'emprise du réseau viaire (en utilisant la médiane)¹¹.

Cette part de canopée est moindre que l'objectif de la Ville de Montréal d'atteindre 25 % de son territoire couvert par la canopée (incluant les arbres de rue, de parcs et des milieux institutionnel et résidentiel) d'ici 2025 (DGPV, Division de l'arboriculture, 2011). Pour

¹⁰ Cette valeur est estimée à partir de la carte de l'utilisation du sol (CMM, 2016) de la Ville de Montréal. L'aire du système viaire (de transport) est de 94 542 817 m² tandis que l'aire totale du territoire à l'étude est de 439 126 008 m².

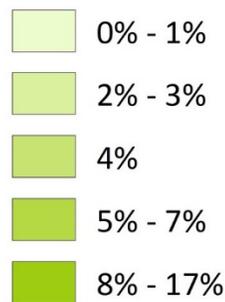
¹¹ Cette valeur est calculée par l'auteure : Pourcentage médian du territoire couvert par la canopée viaire * Aire totale du territoire à l'étude / Aire du système viaire : 4 * 439 126 008 / 94 542 817 = 18,6 %

augmenter ce couvert hypothétique à 25 %, la canopée des arbres de rue devrait couvrir 5 % du territoire total d'après nos calculs, car l'emprise du réseau viaire occupe environ un cinquième du territoire (21,5 %). Ainsi, nous avançons que la Ville de Montréal devrait planter plus d'arbres sur l'emprise de son réseau viaire pour respecter son objectif en commençant par les secteurs de recensement présentant moins de 5 % de canopée viaire. En raison de la variation de la distribution de la canopée viaire, cette recommandation vise l'ensemble des arrondissements, car ils contiennent tous des secteurs de recensement ayant moins de 5 % de canopée viaire. Plus particulièrement, les arrondissements suivants ont une valeur moyenne de canopée inférieure à 5 % : Pierrefonds–Roxboro, Lachine, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Ville-Marie, Saint-Léonard, LaSalle, Mercier–Hochelaga–Maisonneuve, Verdun, Le Sud-Ouest, Ahuntsic–Cartierville, Le Plateau-Mont-Royal et Saint-Laurent (voir la Figure 4.1 et le Tableau 4.1). Autrement dit, seulement trois arrondissements sont, en moyenne, couverts à 5 % ou plus par la canopée des arbres de rue (Rosemont–La-Petite-Patrie (10), Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce (2) et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension (15)).

La cartographie du pourcentage de canopée (Figure 4.1) montre que les quartiers centraux sont bien desservis en canopée de rue, à l'exception de l'arrondissement Ville-Marie. Rosemont–La-Petite-Patrie est l'arrondissement où ce service est le plus élevé.

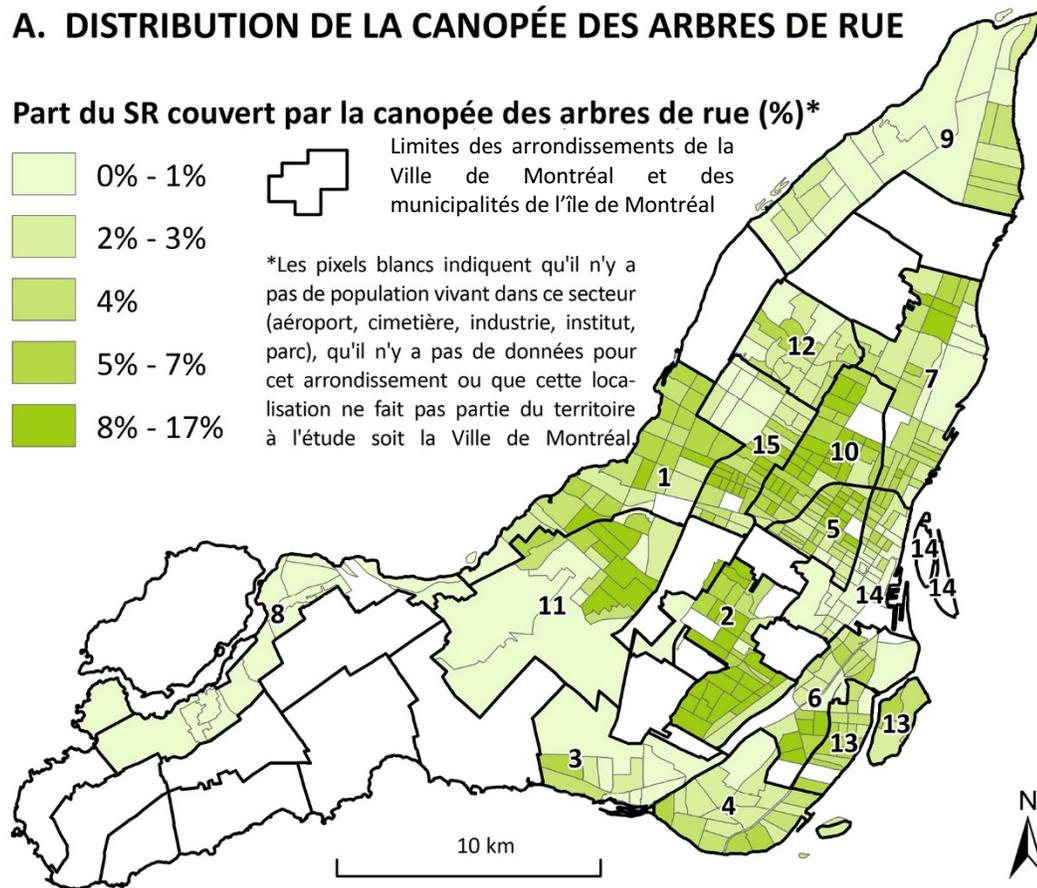
A. DISTRIBUTION DE LA CANOPÉE DES ARBRES DE RUE

Part du SR couvert par la canopée des arbres de rue (%)*



Limites des arrondissements de la Ville de Montréal et des municipalités de l'île de Montréal

*Les pixels blancs indiquent qu'il n'y a pas de population vivant dans ce secteur (aéroport, cimetière, industrie, institut, parc), qu'il n'y a pas de données pour cet arrondissement ou que cette localisation ne fait pas partie du territoire à l'étude soit la Ville de Montréal.



La méthode de discrétisation utilisée est celle des quintiles de la variable exprimée.

Source : Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016.

Réalisation : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic–Cartierville	6 Le Sud-Ouest	11 Saint-Laurent
2 Côte-des-Neiges– Notre-Dame-de-Grâce	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	12 Saint-Léonard
3 Lachine	8 Pierrefonds–Roxboro	13 Verdun
4 LaSalle	9 Rivière-des-Prairies– Pointe-aux-Trembles	14 Ville-Marie
5 Le Plateau-Mont-Royal	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	15 Villeray–Saint-Michel– Parc-Extension

Figure 4.1 Distribution de la canopée des arbres de rue

4.3. RÉDUCTION DE L'INDEX D'UV MOYEN ET DANS L'OMBRE DES ARBRES

Il est à noter qu'aucune différence spatiale n'est observable entre les cartes de la réduction de l'index des rayons ultraviolets (IUV) moyen et de celle de l'IUV dans l'ombre des arbres (Figure 4.2). Ceci n'est pas étonnant considérant la méthode de calcul simpliste de l'*UVMoyen*. Toutefois, l'utilisation des deux indicateurs demeure pertinente dans la quantification de chacun des SE (Tableaux 4.2 et 4.3). Nous discutons, aussi, de l'IUV, en analyse, pour mieux témoigner de leur bénéfice en matière de santé publique.

Tableau 4.2 Statistiques descriptives de la réduction des UV dans l'ombre des arbres (%) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	26,08	34,64	28,62	28,87	1,72
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	26,29	37,18	30,93	31,24	2,95
Lachine	25,98	29,12	26,37	26,88	1,03
LaSalle	26,58	30,24	27,52	27,85	1,03
Le Plateau-Mont-Royal	26,17	32,29	28,35	28,88	1,72
Le Sud-Ouest	26,10	32,62	28,03	28,63	1,67
Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	26,05	33,67	28,15	28,36	1,61
Pierrefonds–Roxboro	26,01	26,24	26,09	26,12	0,08
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	26,04	28,27	26,77	26,94	0,77
Rosemont–La-Petite-Patrie	26,91	39,37	31,11	31,35	2,68
Saint-Laurent	26,03	34,36	27,99	29,07	2,52
Saint-Léonard	26,52	29,13	27,39	27,60	0,77
Verdun	26,74	29,93	28,19	28,35	0,98
Ville-Marie	26,09	30,31	26,78	27,33	1,23
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	26,21	35,40	28,93	29,41	2,55
Ensemble du territoire	25,98	39,37	28,18	28,81	2,37

Tableau 4.3 Statistiques descriptives de la réduction moyenne des UV sur le territoire (*UVMoyen*) (%) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	2,00	14,43	4,93	5,35	2,49
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	2,18	18,83	8,15	8,95	4,57
Lachine	1,92	5,65	2,25	2,84	1,19
LaSalle	2,43	7,23	3,28	3,87	1,41
Le Plateau-Mont-Royal	2,07	10,06	4,54	5,32	2,34
Le Sud-Ouest	2,02	10,70	4,07	4,98	2,31
Mercier–Hochelaga–Maisonnette	1,98	12,68	4,25	4,66	2,22
Pierrefonds–Roxboro	1,94	2,14	2,01	2,04	0,07
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	1,97	4,42	2,59	2,84	0,83
Rosemont–La-Petite-Patrie	2,70	22,07	8,38	9,03	4,19
Saint-Laurent	1,96	13,92	4,00	5,74	3,53
Saint-Léonard	2,37	5,67	3,13	3,54	1,01
Verdun	2,56	6,79	4,30	4,57	1,35
Ville-Marie	2,01	7,32	2,59	3,37	1,53
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	2,11	15,76	5,38	6,19	3,70
Ensemble du territoire	1,92	22,07	4,29	5,37	3,42

Les résultats des calculs dans *i-Tree Eco* montrent que les arbres de rue d'un secteur de recensement peuvent réduire jusqu'à 39 % des rayons UV dans son ombre à lui seul (avec un azimut à midi) (Tableau 4.2). En moyenne, les arbres d'un secteur de recensement interceptent 28 % des rayons UV dans leur ombre. Les arbres de rue d'un secteur de recensement peuvent réduire jusqu'à 22 % des rayons UV sur le territoire dans son ensemble (Tableau 4.3, valeur maximale calculée pour l'ensemble du territoire).

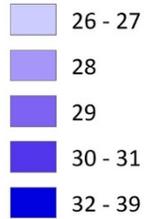
Le soleil est dommageable pour la santé lorsque l'IUV est de 3 ou plus, ce qui est habituellement le cas entre 11 h et 15 h durant les mois d'avril à septembre au Canada même lorsque le ciel est nuageux (Gouvernement du Canada, 2018b). Par exemple, on observait un IUV « très élevé » (8) pour Montréal lors d'une journée au ciel gris en juillet 2018 (Gouvernement du Canada, 2018a). Selon la compilation des calculs d'*i-Tree Eco*, l'IUV peut être réduit de 1,5 sous l'ombre des arbres et de 1 sur l'ensemble du territoire en moyenne. Puisque la canopée est très efficace pour réduire l'IUV, on peut en conclure qu'elle

joue un rôle important dans la diminution du nombre de cas de cancers de la peau, de coups de soleil et de chaleur, de maladies oculaires et hydriques ainsi que dans la réduction des îlots de chaleur (Gies et al., 2018; INSPQ, 2001-2010c; maints auteurs dans Locke et al., 2010).

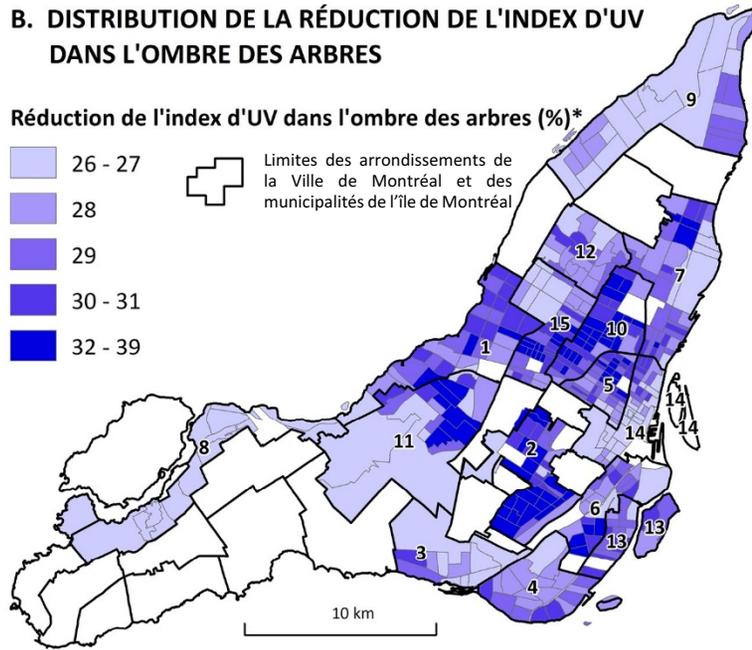
La capacité d'intercepter les rayons UV d'une essence contribue aussi à la variation des résultats de l'*UVOmbre*, à cause de la grandeur de leur indice de surface foliaire (Qi et al., 2010 dans Na et al., 2014). La plupart des secteurs ont une réduction de 26 à 31 % de *UVOmbre* et de 2 à 8 % pour l'*UVMoyen*. La forêt urbaine de certains secteurs de recensement contient des essences réduisant en moyenne l'IUV de 39 % (Tableau 4.3). Plus spécifiquement, les secteurs de recensement ayant les plus fortes valeurs d'*UVOmbre* ont des forêts principalement composées d'Érables argentés (*Acer saccharinum*), d'Érables de Norvège (*Acer planatoïdes*) et de Frênes rouges (*Fraxinus pennsylvanica*). Au contraire, les secteurs de recensement ayant les plus faibles valeurs d'*UVOmbre* comptent peu ou pas de ces essences et sont principalement composés de Féviers d'Amérique (*Gleditsia Triacanthos*). Ces disparités sont conséquentes au fait que les trois premières essences ont une forte valeur (4 à 6) d'indice de surface foliaire (surface foliaire / canopée) en contraste avec la dernière (indice de surface foliaire < 2).

**B. DISTRIBUTION DE LA RÉDUCTION DE L'INDEX D'UV
DANS L'OMBRE DES ARBRES**

Réduction de l'index d'UV dans l'ombre des arbres (%)*



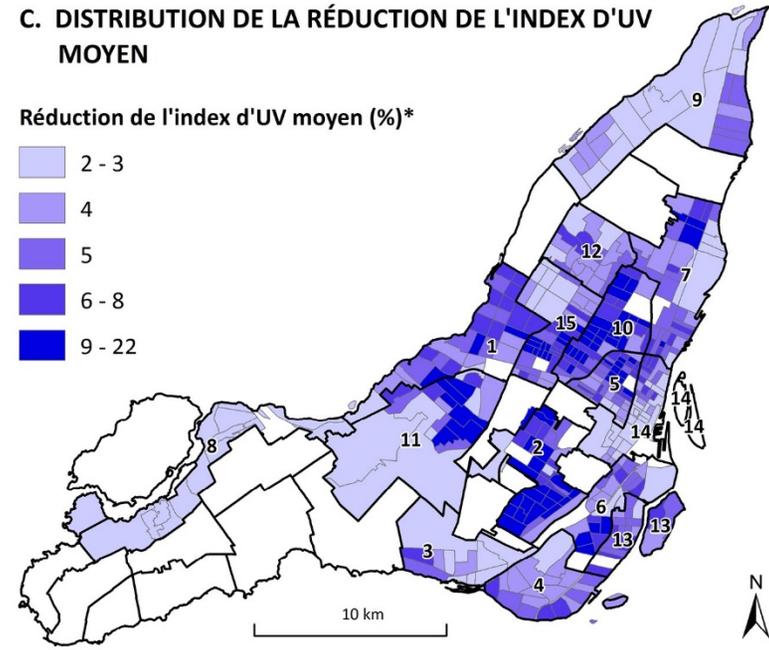
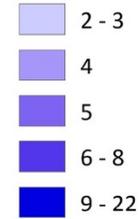
Limites des arrondissements de la Ville de Montréal et des municipalités de l'île de Montréal



*Les pixels blancs indiquent qu'il n'y a pas de population vivant dans ce secteur (aéroport, cimetière, industrie, institut, parc), qu'il n'y a pas de données pour cet arrondissement ou que cette localisation ne fait pas partie du territoire à l'étude soit la ville de Montréal.

**C. DISTRIBUTION DE LA RÉDUCTION DE L'INDEX D'UV
MOYEN**

Réduction de l'index d'UV moyen (%)*



La méthode de discrétisation utilisée est celle des quintiles de la variable exprimée.
Source : Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016.
Réalisation : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Arrondissements du territoire d'étude

- | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|--|---|
| 1 Ahuntsic-Cartierville | 5 Le Plateau-Mont-Royal | 9 Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles | 13 Verdun |
| 2 Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce | 6 Le Sud-Ouest | 10 Rosemont-La-Petite-Patrie | 14 Ville-Marie |
| 3 Lachine | 7 Mercier-Hochelaga-Maisonneuve | 11 Saint-Laurent | 15 Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension |
| 4 LaSalle | 8 Pierrefonds-Roxboro | 12 Saint-Léonard | |

Figure 4.2 Distribution de la réduction de l'index de rayons ultraviolets (UV) par les arbres de rue

D'ailleurs, Jensen, Hardin et Hardin (2012) exemplifient les différences possibles de densité et d'opacité de canopée entre les essences en utilisant un Érable de Norvège (*Acer planatoïdes*) et un Févier d'Amérique (*Gleditsia Triacanthos*). En plus, notre découverte de la participation importante des frênes à l'*UV*Ombre renforce les appréhensions au regard des ravages de l'agrile du frêne.

4.4. POTENTIEL D'ÉVAPOTRANSPIRATION ET RÉDUCTION DU RUISSELLEMENT

Le potentiel d'évapotranspiration (*PotÉvapotr*) et la réduction du ruissellement (*RéductRuiss*) varient grandement à travers le territoire étudié : de 1 à 453 m³ d'eau/an/ha et de 0 à 21 m³ d'eau/an/ha respectivement (Tableaux 4.4 et 4.5). Cela s'observe aussi à la lecture des valeurs médianes et moyennes. Par exemple, les médianes de *PotÉvapotr* varient entre 6 et 212 m³ d'eau/an/ha. Dans l'ensemble du territoire, les arbres de rue d'un secteur de recensement ont un potentiel d'évapotranspiration de 99 m³ d'eau/an/ha. De plus, ils y réduisent de 4,5 m³ d'eau/an/ha le ruissellement. Rappelons que le « *PotÉvapotr* est la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration des arbres qui se produiraient si une quantité illimitée d'eau était disponible [Notre traduction d'*i-Tree*, 2017b, p. 82].

À la lecture de deux cartes à la Figure 4.3, nous constatons que 61 % des secteurs de recensement sur rive sont ceux ayant le moins de *RéductRuiss* par les arbres de rue (appartenant aux quintiles 1 et 2). D'ailleurs, tous les arrondissements en bordure de rive¹² ont au moins un secteur de recensement riverain ayant une faible *RéductRuiss*, soit dans les quintiles 1 et 2 de cette variable. Les écarts-types de ces SE à l'échelle des arrondissements nous informe que le potentiel d'évapotranspiration et la réduction du ruissellement varient bien plus entre les secteurs de recensement de Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, de Rosemont–La-Petite-Patrie, de Saint-Laurent et de Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension (valeurs des écarts-types dans les Tableaux 4.4 et 4.5). À l'inverse, la prestation de ces SE

¹² Ahuntsic–Cartierville, Lachine, LaSalle, Mercier–Hochelaga–Maisonnette, Pierrefonds–Roxboro, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Saint-Laurent, Le Sud-Ouest, Verdun et Ville-Marie.

fluctue peu à Pierrefonds–Roxboro (Tableaux 4.4 et 4.5), car il y a peu d’arbres de rue dans l’ensemble de cet arrondissement.

Tableau 4.4 Statistiques descriptives de l’estimation du potentiel d’évapotranspiration (*PotÉvapotr*) (m³ d’eau/an/ha) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

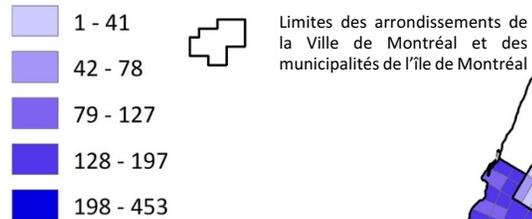
Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	5,22	356,78	117,62	124,71	72,05
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	13,35	399,24	202,30	211,30	109,29
Lachine	0,79	142,97	19,03	41,65	46,31
LaSalle	26,36	185,23	71,34	83,80	44,80
Le Plateau-Mont-Royal	8,77	267,44	111,03	126,47	70,58
Le Sud-Ouest	6,63	269,62	94,52	115,76	69,64
Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	4,17	314,53	95,98	104,26	65,25
Pierrefonds–Roxboro	1,95	13,64	5,96	7,30	3,87
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	3,50	99,60	36,18	44,59	33,25
Rosemont–La-Petite-Patrie	32,89	453,22	211,83	218,54	95,87
Saint-Laurent	2,66	315,90	93,63	131,57	101,01
Saint-Léonard	27,06	136,47	67,20	75,09	31,97
Verdun	28,13	178,58	102,48	106,17	43,56
Ville-Marie	5,82	187,71	38,97	62,02	56,32
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	12,72	369,71	128,38	145,36	101,09
Ensemble du territoire	0,79	453,22	98,67	120,82	92,90

Tableau 4.5 Statistiques descriptives de la réduction du ruissellement (*RéductRuiss*) (m³ d'eau/an/ha) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

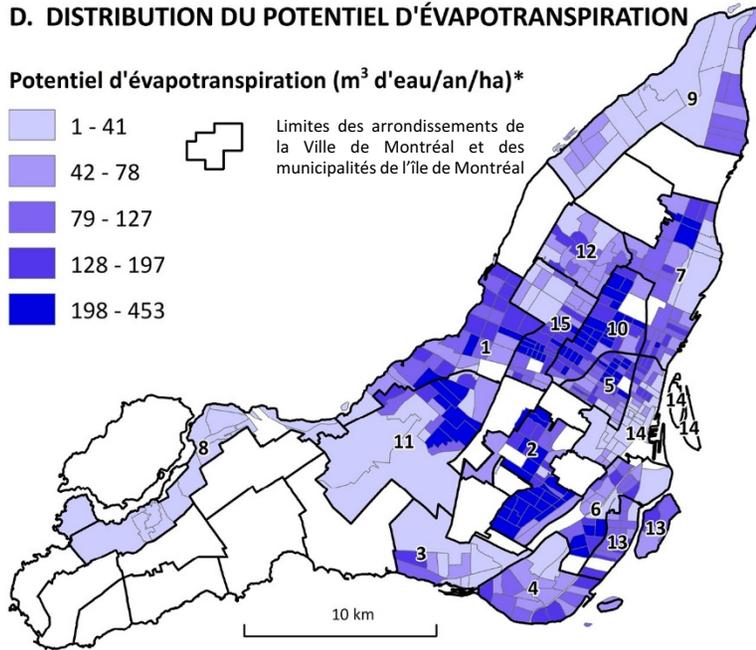
Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	0,24	16,06	5,30	5,61	3,24
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	0,61	18,21	9,23	9,64	4,99
Lachine	0,04	6,69	0,89	1,95	2,17
LaSalle	1,18	8,32	3,20	3,76	2,01
Le Plateau-Mont-Royal	0,40	12,16	5,05	5,75	3,21
Le Sud-Ouest	0,30	12,27	4,30	5,27	3,17
Mercier–Hochelaga–Maisonnette	0,19	14,37	4,39	4,76	2,98
Pierrefonds–Roxboro	0,10	0,69	0,30	0,37	0,20
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	0,16	4,57	1,66	2,04	1,52
Rosemont–La-Petite-Patrie	1,50	20,63	9,64	9,95	4,36
Saint-Laurent	0,12	14,48	4,29	6,03	4,63
Saint-Léonard	1,28	6,43	3,17	3,54	1,51
Verdun	1,73	10,96	6,29	6,51	2,67
Ville-Marie	0,27	8,58	1,78	2,83	2,57
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	0,58	16,86	5,86	6,63	4,61
Ensemble du territoire	0,04	20,63	4,54	5,58	4,25

D. DISTRIBUTION DU POTENTIEL D'ÉVAPOTRANSPIRATION

Potentiel d'évapotranspiration (m³ d'eau/an/ha)*



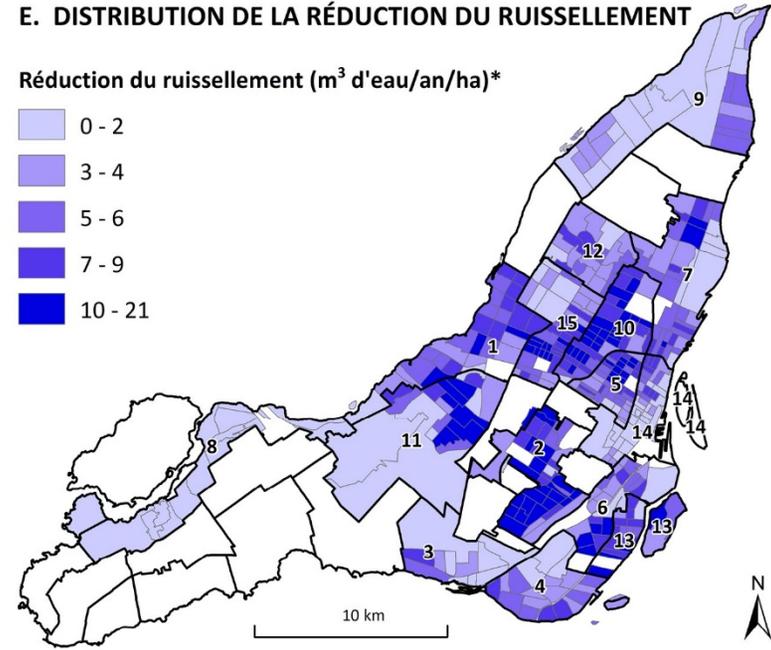
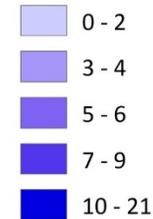
Limites des arrondissements de la Ville de Montréal et des municipalités de l'île de Montréal



*Les pixels blancs indiquent qu'il n'y a pas de population vivant dans ce secteur (aéroport, cimetière, industrie, institut, parc), qu'il n'y a pas de données pour cet arrondissement ou que cette localisation ne fait pas partie du territoire à l'étude soit la ville de Montréal.

E. DISTRIBUTION DE LA RÉDUCTION DU RUISSELLEMENT

Réduction du ruissellement (m³ d'eau/an/ha)*



La méthode de discrétisation utilisée est celle des quintiles de la variable exprimée.
Source : Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016.
Réalisation : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic–Cartierville	5 Le Plateau–Mont-Royal	9 Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	13 Verdun
2 Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	6 Le Sud-Ouest	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	14 Ville-Marie
3 Lachine	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	11 Saint-Laurent	15 Villieray–Saint-Michel–Parc-Extension
4 LaSalle	8 Pierrefonds–Roxboro	12 Saint-Léonard	

Figure 4.3 Distributions du potentiel d'évapotranspiration et de la réduction du ruissellement des/par les arbres de rue par secteur de recensement

La somme des quantités d'eau interceptée par les arbres de rue montréalais (par le potentiel d'évapotranspiration et par la réduction ruissellement) est de 1 699 701 m³ d'eau/an. Ceci équivaut à la quantité annuelle d'eau rejetée par 3 992 Montréalais¹³ et à une économie annuelle de 272 462,07 \$¹⁴ en traitement d'eaux usées selon le coût tarifaire de 2016 (à 0,1603 \$/m³) (Ville de Montréal, s. d. a). Les bénéfices monétaires du *PotÉvopotr* et de la *RéductRuiss* seront de plus en plus appréciés en raison de la croissance démographique de la Ville de Montréal et de la variation, parfois à la hausse, du coût tarifaire en traitement d'eaux grises depuis 2012 (*ibid.*), une dépense assumée par la ville.

Pensons aussi à l'apport du *PotÉvopotr* de la *RéductRuiss* dans la lutte à d'autres inconvénients mentionnés au Chapitre 1, notamment les coûts et la perte de revenus fonciers associés aux crues et à l'érosion des berges (Lachance (dir.), 2017) qui sont difficilement estimables. Aussi, le *PotÉvopotr* et la *RéductRuiss* réduisent l'utilisation de produits chimiques nécessaires au traitement des eaux usées lors des averses, car leur concentration doit augmenter avec le volume d'eau (*ibid.*). Sur le plan de la santé publique, rappelons que l'évapotranspiration des arbres rafraîchit l'air ambiant ce qui permet d'atténuer les îlots de chaleur (Locke *et al.*, 2010).

4.5. RETRAIT DU CO, NO₂, O₃, SO₂ ET DES PM_{2,5}

La variation à travers le territoire des résultats du retrait du CO, NO₂, O₃, SO₂ et des PM_{2,5} (*Retr5Poll*) (Tableau 4.6) peut sembler faible en raison des ressemblances entre la médiane et la moyenne de l'ensemble du territoire d'étude (1,2 kg/an/ha et 1,4 kg/an/ha, respectivement) ainsi qu'entre ces deux statistiques et l'écart-type (1,1 kg/an/ha). Toutefois, l'écart-type équivaut à 22% de la valeur

¹³ Cette valeur est calculée par l'auteur : $[RéductRuiss (m^3/ha/an) + PotÉvopotr (m^3/ha/an)] /$ Quantité annuelle moyenne d'eau rejetée par Montréalais = Équivalent en nombre d'habitants de la quantité d'eau moyenne usée annuellement par un Montréalais en quantité d'eau (m³) interceptée par la *RéductRuiss* et par le *PotÉvopotr* annuellement : $(75\,703 + 1\,623\,998) / 425,75 = 3\,992$ habitants

¹⁴ Cette valeur est calculée par l'auteur : Coût tarifaire de 2016 du traitement d'eaux usées à la Ville de Montréal (\$) * $[RéductRuiss (m^3/ha/an) + PotÉvopotr (m^3/ha/an)]$: $0,1603 (75\,703 + 1\,623\,998) = 272\,462,0703$ \$ (voir Tableau 4.11)

maximale (5kg/ha/an), une part non négligeable. L'ordre d'importance du *Retr5Poll* à travers les arrondissements varie peu par rapport à ceux des SE précédents. Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce et Pierrefonds–Roxboro sont toujours les arrondissements produisant, respectivement, le plus et le moins de ce SE.

Tableau 4.6 Statistiques descriptives du retrait de cinq polluants (*Retr5Poll*) (kg/an/ha) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	0,05	4,14	1,39	1,45	0,84
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	0,00	4,74	2,50	2,48	1,29
Lachine	0,00	1,69	0,24	0,48	0,54
LaSalle	0,32	2,09	0,76	0,95	0,53
Le Plateau-Mont-Royal	0,00	3,23	1,27	1,44	0,88
Le Sud-Ouest	0,10	3,22	1,11	1,32	0,83
Mercier–Hochelaga–Maisonnette	0,00	3,67	1,17	1,21	0,76
Pierrefonds–Roxboro	0,00	0,17	0,08	0,08	0,05
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	0,03	1,20	0,43	0,52	0,39
Rosemont–La-Petite-Patrie	0,43	5,09	2,46	2,53	1,12
Saint-Laurent	0,03	3,72	1,12	1,55	1,17
Saint-Léonard	0,30	1,61	0,81	0,88	0,38
Verdun	0,38	2,28	1,40	1,34	0,56
Ville-Marie	0,00	2,43	0,44	0,70	0,73
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	0,16	4,34	1,48	1,74	1,24
Ensemble du territoire	0,00	5,09	1,15	1,41	1,10

L'indice de surface foliaire (m²) est corrélé à 0,99 avec le *Retr5Poll* laissant supposer que le calcul du *Retr5Poll* dépend uniquement de la masse foliaire qui relève, à son tour, de l'essence (Nowak, 1996). On peut en déduire que les secteurs de recensement contenant des essences ayant des indices de surface foliaire¹⁵ élevés retirent davantage de polluants dans l'air (*Retr5Poll*) que les autres, et ce, à canopée égale. À l'inverse, les secteurs de recensement dont la forêt est majoritairement composée d'essences ayant un faible indice de surface

¹⁵ L'indice de surface foliaire est un taux exprimant la propension d'une essence à avoir une canopée très couvrante/dense/opaque.

foliaire comme le Févier d'Amérique (*Gleditsia Triacanthos*), le Frêne rouge « Summit » (*Fraxinus pennsylvanica "Summit"*) ou le Bouleau européen/verrupeux (*Betula pendula*) présentent des valeurs de *Retr5Poll* plus faibles.

La différence entre les concentrations de base des 5 polluants ciblés [*Air Quality Benefits Assessment Tool* (AQBAT), 2002 dans INSPQ, 2007; Ministère de l'Environnement et du changement climatique du Canada (MECCC), 2016] et celles observées sur l'île de Montréal en 2013 (NASP, 2013) montre que le NO₂, les PM_{2,5}, le SO₂ puis le CO sont présents en concentration trop élevée dans l'air à Montréal dans cet ordre d'importance¹⁶. Les arbres aident à diminuer la quantité de polluants dans l'environnement montréalais. Mais, nous ne pouvons pas prédire la quantité d'arbres à planter, car les organismes cités ci-dessus et *i-Tree* n'utilisent pas les mêmes unités pour exprimer le retrait des polluants présenté à la Figure 4.4.

¹⁶ NO₂ : concentration de base = 0 ppm (0 µg/m³); concentration observée par les capteurs de pollution sur le territoire d'étude = 12 µg/m³.

PM_{2,5} : concentration de base = 1,8 µg/m³; concentration observée par les capteurs de pollution sur le territoire d'étude = 10,4 µg/m³.

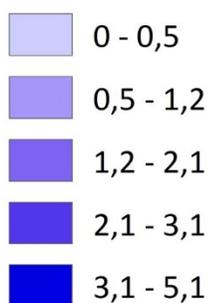
SO₂ : concentration de base = 0 ppb (0 µg/m³); concentration observée par les capteurs de pollution sur le territoire d'étude = 1,4 µg/m³.

CO : concentration de base = 0 ppm (0 µg/m³); concentration observée par les capteurs de pollution sur le territoire d'étude = 0,4 µg/m³.

O₃ : concentration de base = 28 ppb; concentration observée par les capteurs de pollution sur le territoire d'étude = 23,2 ppb.

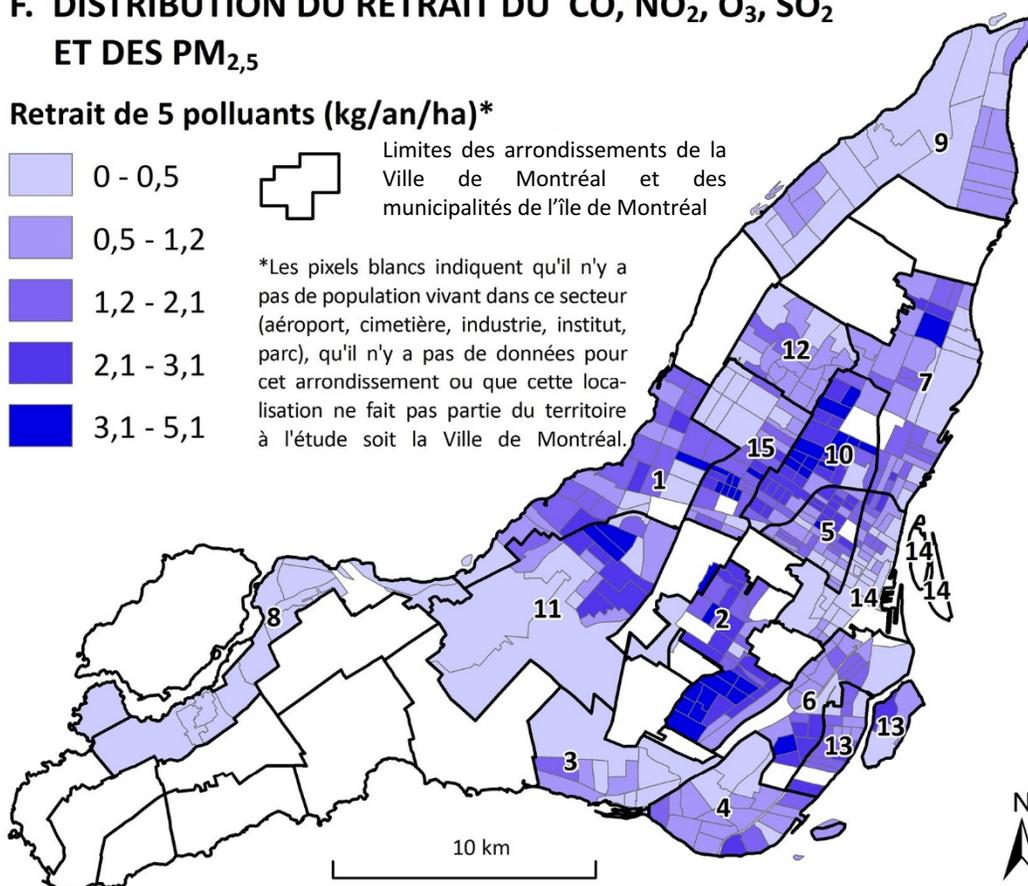
F. DISTRIBUTION DU RETRAIT DU CO, NO₂, O₃, SO₂ ET DES PM_{2,5}

Retrait de 5 polluants (kg/an/ha)*



Limites des arrondissements de la
Ville de Montréal et des
municipalités de l'île de Montréal

*Les pixels blancs indiquent qu'il n'y a pas de population vivant dans ce secteur (aéroport, cimetière, industrie, institut, parc), qu'il n'y a pas de données pour cet arrondissement ou que cette localisation ne fait pas partie du territoire à l'étude soit la Ville de Montréal.



La méthode de discrétisation utilisée est celle des quintiles de la variable exprimée.

Source : Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic–Cartierville	6 Le Sud-Ouest	11 Saint-Laurent
2 Côte-des-Neiges– Notre-Dame-de-Grâce	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	12 Saint-Léonard
3 Lachine	8 Pierrefonds–Roxboro	13 Verdun
4 LaSalle	9 Rivière-des-Prairies– Pointe-aux-Trembles	14 Ville-Marie
5 Le Plateau-Mont-Royal	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	15 Villeray–Saint-Michel– Parc-Extension

Figure 4.4 Distribution du retrait du CO, NO₂, O₃, SO₂ et des PM_{2,5} par les arbres de rue

4.6. SÉQUESTRATION ET DÉPÔT DU CARBONE

Les quantités de carbone séquestré et déposé sont présentées aux Tableaux 4.7 et 4.8. Les arbres de rue d'un secteur peuvent séquestrer jusqu'à 133 kg de carbone par hectare annuellement. La valeur médiane par secteur de recensement dans l'ensemble du territoire est de 30 kg/an/ha. En observant les valeurs médianes à travers les arrondissements, nous constatons que l'ordre des arrondissements change légèrement d'un tableau et à l'autre. Les quatre arrondissements les plus pourvus en ces deux SE sont Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Rosemont–La-Petite-Patrie, Ahuntsic–Cartierville et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension. Les quatre les plus dépourvus sont Pierrefonds–Roxboro, Lachine, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles et Ville-Marie.

Tableau 4.7 Statistiques descriptives de la séquestration du carbone (*SéqC*) (kg/an/ha) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	1,73	102,97	39,66	38,62	20,55
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	4,44	128,76	69,14	68,56	34,96
Lachine	0,25	49,72	5,99	14,35	16,25
LaSalle	8,54	58,02	21,63	26,42	14,22
Le Plateau-Mont-Royal	2,79	75,70	31,76	37,04	20,20
Le Sud-Ouest	1,82	68,48	28,66	32,56	17,61
Mercier–Hochelaga–Maisonnette	1,23	97,91	28,26	30,49	19,40
Pierrefonds–Roxboro	0,65	4,50	1,97	2,37	1,22
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	1,03	31,09	11,68	13,76	10,43
Rosemont–La-Petite-Patrie	12,99	132,62	59,44	63,08	27,99
Saint-Laurent	0,92	104,87	29,23	42,45	32,96
Saint-Léonard	8,25	46,44	21,39	23,74	10,46
Verdun	11,77	56,89	32,79	34,47	14,26
Ville-Marie	1,97	53,69	11,99	18,26	15,71
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	4,49	101,41	40,71	42,58	28,38
Ensemble du territoire	0,25	132,62	29,75	36,57	27,90

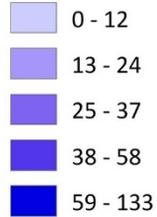
Tableau 4.8 Statistiques descriptives du dépôt du carbone (*DépôtC*) (kg/an/ha) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	1,73	102,97	39,66	38,62	20,55
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	4,44	128,76	69,14	68,56	34,96
Lachine	0,25	49,72	5,99	14,35	16,25
LaSalle	8,54	58,02	21,63	26,42	14,22
Le Plateau-Mont-Royal	2,79	75,70	31,76	37,04	20,20
Le Sud-Ouest	1,82	68,48	28,66	32,56	17,61
Mercier–Hochelaga–Maisonnette	1,23	97,91	28,26	30,49	19,40
Pierrefonds–Roxboro	0,65	4,50	1,97	2,37	1,22
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	1,03	31,09	11,68	13,76	10,43
Rosemont–La-Petite-Patrie	12,99	132,62	59,44	63,08	27,99
Saint-Laurent	0,92	104,87	29,23	42,45	32,96
Saint-Léonard	8,25	46,44	21,39	23,74	10,46
Verdun	11,77	56,89	32,79	34,47	14,26
Ville-Marie	1,97	53,69	11,99	18,26	15,71
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	4,49	101,41	40,71	42,58	28,38
Ensemble du territoire	0,92	486,30	109,09	134,11	102,32

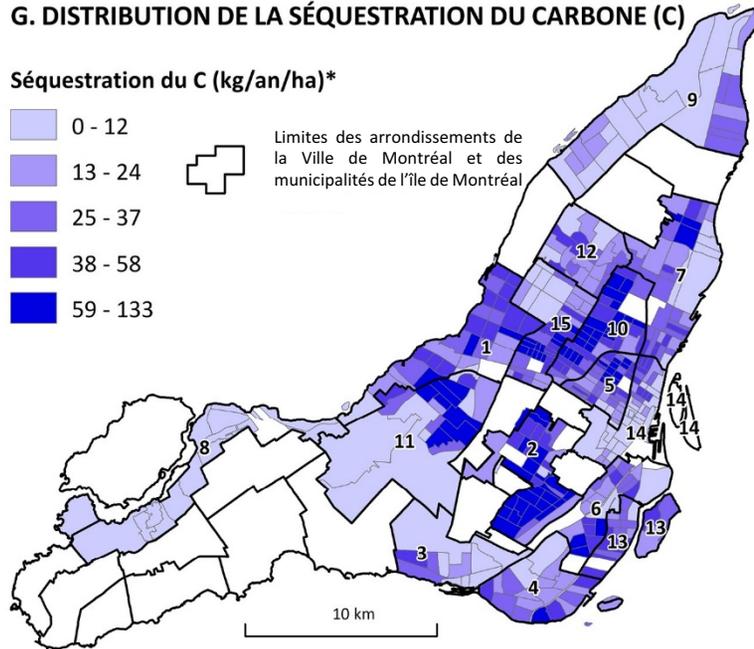
Le réchauffement climatique a soulevé l'importance des forêts comme régulatrice du climat en raison de leur grande capacité à retirer de l'air le dioxyde de carbone (CO₂) - responsable du réchauffement climatique. Le dépôt du carbone dans la biomasse des arbres assure un retrait considérable du CO₂ de l'air ambiant. La majeure partie du carbone (C) qu'ils auront séquestré durant leur vie sera transférée dans le sol lors de leur décomposition. La quantité de carbone transférée au sol dépend du fait que les arbres seront brûlés ou non. En captant le carbone du CO₂, les arbres relâchent de l'oxygène (O₂) dans l'atmosphère.

G. DISTRIBUTION DE LA SÉQUESTRATION DU CARBONE (C)

Séquestration du C (kg/an/ha)*



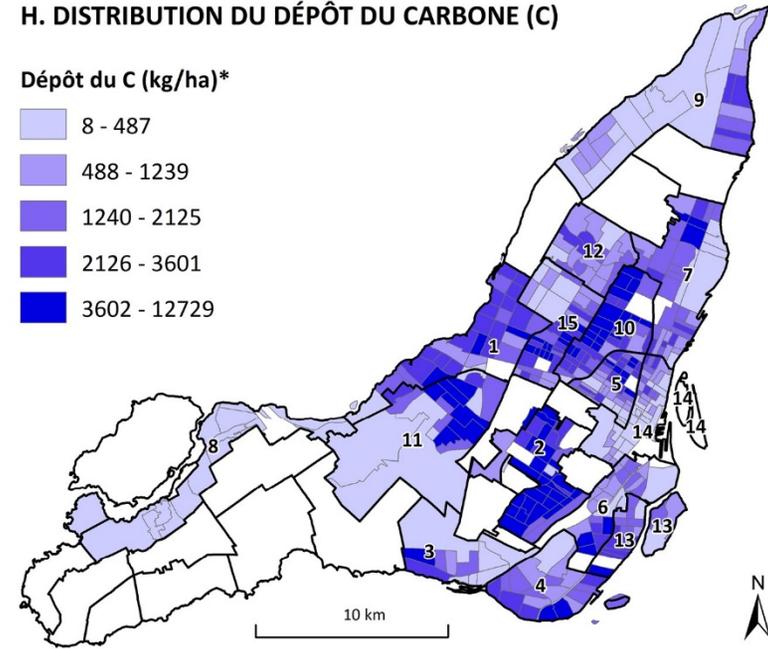
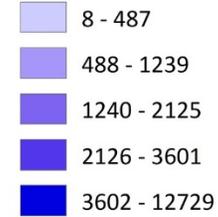
Limites des arrondissements de la Ville de Montréal et des municipalités de l'île de Montréal



*Les pixels blancs indiquent qu'il n'y a pas de population vivant dans ce secteur (aéroport, cimetière, industrie, institut, parc), qu'il n'y a pas de données pour cet arrondissement ou que cette localisation ne fait pas partie du territoire à l'étude soit la ville de Montréal.

H. DISTRIBUTION DU DÉPÔT DU CARBONE (C)

Dépôt du C (kg/ha)*



La méthode de discrétisation utilisée est celle des quintiles de la variable exprimée.
Source : Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016.
Réalisation : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic–Cartierville	5 Le Plateau–Mont-Royal	9 Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	13 Verdun
2 Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	6 Le Sud-Ouest	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	14 Ville-Marie
3 Lachine	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	11 Saint-Laurent	15 Villieray–Saint-Michel–Parc-Extension
4 LaSalle	8 Pierrefonds–Roxboro	12 Saint-Léonard	

Figure 4.5 Distributions de la séquestration et du dépôt du carbone (C) par les arbres de rue

4.7. PRODUCTIONS D'OXYGÈNE ET DE COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS

Les quantités d'oxygène (O_2) et de composés organiques volatils (COVs) sont présentées aux Tableaux 4.9 et 4.10. Les arbres de rue d'un secteur de recensement produisent de 0,70 à 353,60 kg d' O_2 par an par hectare pour une valeur médiane de 79,30 kg. Ils rejettent, aussi, de 0,00 à 0,91 kg de COVs par an par hectare pour une valeur médiane de 0,17 kg. Les changements de rang d'arrondissement sont les mêmes pour la *ProdO₂* et la *ProdCOVs* suggérant que les essences produisant plus de COVs sont aussi celles produisant davantage d' O_2 . Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce est l'arrondissement le plus productif en O_2 et en COVs suivi par Rosemont–La-Petite-Patrie. Les arrondissements libérant le moins d' O_2 et de COVs par l'entremise de leurs arbres de rue sont Pierrefonds–Roxboro puis Lachine.

Ainsi, les quatre arrondissements produisant le moins d' O_2 sont Pierrefonds–Roxboro, Lachine, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles et Ville-Marie comme pour la canopée. Les quatre arrondissements produisant le plus de COVs — et, conséquemment, dont les citoyens allergiques au pollen en subiront davantage de désagrément — sont Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Rosemont–La-Petite-Patrie, Verdun et Saint-Laurent. En contrepartie, ces arrondissements voient leur accès à la *ProdO₂* augmenté par rapport à leur rendement pour les autres SE.

Tableau 4.9 Statistiques descriptives de la production d'oxygène ($ProdO_2$) (kg/an/ha) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	4,60	274,60	105,80	102,97	54,81
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	11,80	343,40	184,35	182,82	93,24
Lachine	0,70	132,60	16,00	38,29	43,34
LaSalle	22,80	154,70	57,70	70,45	37,91
Le Plateau-Mont-Royal	7,50	201,90	84,70	98,78	53,86
Le Sud-Ouest	4,90	182,60	76,40	86,84	46,97
Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	3,30	261,10	75,35	81,30	51,73
Pierrefonds–Roxboro	1,70	12,00	5,30	6,32	3,27
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	2,70	82,90	31,10	36,70	27,82
Rosemont–La-Petite-Patrie	34,60	353,60	158,50	168,21	74,65
Saint-Laurent	2,40	279,70	78,00	113,22	87,90
Saint-Léonard	22,00	123,80	57,05	63,31	27,90
Verdun	31,40	151,70	87,40	91,91	38,02
Ville-Marie	5,20	143,20	32,00	48,69	41,89
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	12,00	270,40	108,60	113,55	75,67
Ensemble du territoire	0,70	353,60	79,30	97,53	74,41

Tableau 4.10 Statistiques descriptives de la production de composés organiques volatils (*ProdCOVs*) (kg/an/ha) obtenues pour les secteurs de recensement, par arrondissement

Arrondissement	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Écart-type
Ahuntsic–Cartierville	0,01	0,62	0,17	0,20	0,13
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	0,01	0,91	0,41	0,42	0,24
Lachine	0,00	0,32	0,04	0,09	0,10
LaSalle	0,05	0,36	0,13	0,16	0,10
Le Plateau-Mont-Royal	0,01	0,50	0,20	0,20	0,12
Le Sud-Ouest	0,01	0,31	0,11	0,13	0,08
Mercier–Hochelaga–Maisonnette	0,00	0,65	0,14	0,15	0,12
Pierrefonds–Roxboro	0,00	0,03	0,01	0,01	0,01
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	0,00	0,22	0,07	0,09	0,07
Rosemont–La-Petite-Patrie	0,03	0,77	0,29	0,30	0,19
Saint-Laurent	0,00	0,74	0,22	0,30	0,24
Saint-Léonard	0,05	0,35	0,16	0,17	0,07
Verdun	0,08	0,89	0,28	0,38	0,26
Ville-Marie	0,00	0,34	0,05	0,10	0,09
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	0,01	0,56	0,20	0,22	0,16
Ensemble du territoire	0,00	0,91	0,17	0,21	0,18

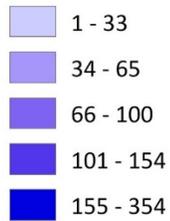
La transformation du CO₂ en O₂ par les arbres et les plantes assure le renouvellement d'un élément vital pour les vivants, l'O₂. Du manque d'oxygène dans le sang découlent plusieurs problèmes de santé. Les décès qui s'en suivent peuvent être attribués à ces problèmes plutôt qu'à leur cause, un trouble d'oxygénation (OMS, 2005). Les aînés, les jeunes et les individus souffrant d'un problème respiratoire ont davantage besoin d'absorber de l'O₂ sans respirer de polluants.

Les COVs participent à la formation de PM_{2,5} (MECCC, 2013-2017). Les COVs les plus dangereux sont ceux qui se combinent aux oxydes d'azote (NO_x) pour former de l'ozone (O₃) (*ibid.*). Heureusement, le pollen n'est pas un type de COVs très réactif, c'est-à-dire qu'il ne réagit pas facilement au contact d'autres particules pour former des combinaisons avec ces dernières (Maykut et al., 2003 dans Pui *et al.*, 2014). De surcroît, le secteur de recensement produisant la plus grande quantité de COVs par hectare annuellement est également le second secteur de recensement retirant le plus de polluants,

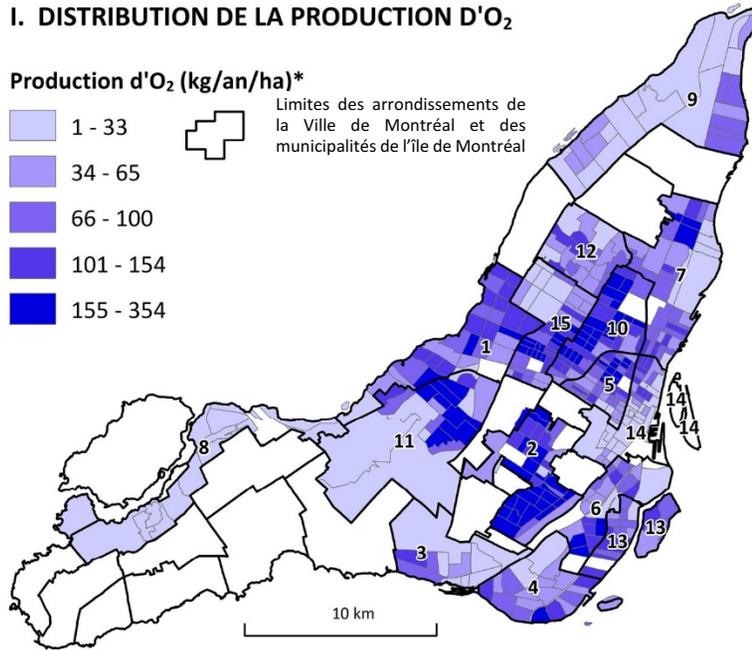
dont le NO_2 , l' O_3 et les $\text{PM}_{2,5}$. Il se situe dans l'arrondissement Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce. Ainsi, il n'est pas nécessaire de s'inquiéter de la contribution des COVs dans la formation de polluants. Les COVs dont il est question, les pollens, sont seulement dommageables pour les individus qui y sont allergiques. Donc, les COVs produits par les arbres ont peu d'impacts négatifs sur la santé publique.

I. DISTRIBUTION DE LA PRODUCTION D'O₂

Production d'O₂ (kg/an/ha)*



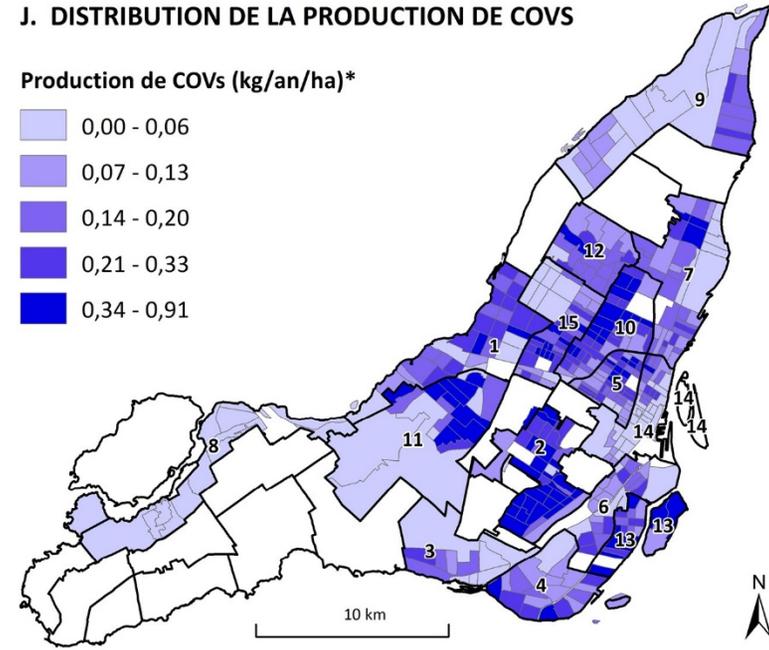
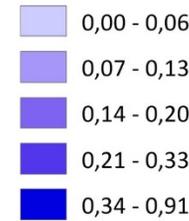
Limites des arrondissements de la Ville de Montréal et des municipalités de l'île de Montréal



*Les pixels blancs indiquent qu'il n'y a pas de population vivant dans ce secteur (aéroport, cimetière, industrie, institut, parc), qu'il n'y a pas de données pour cet arrondissement ou que cette localisation ne fait pas partie du territoire à l'étude soit la ville de Montréal.

J. DISTRIBUTION DE LA PRODUCTION DE COVS

Production de COVs (kg/an/ha)*



La méthode de discrétisation utilisée est celle des quintiles de la variable exprimée.
 Source : Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016.
 Réalisation : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Arrondissements du territoire d'étude

- | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|--|---|
| 1 Ahuntsic-Cartierville | 5 Le Plateau-Mont-Royal | 9 Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles | 13 Verdun |
| 2 Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce | 6 Le Sud-Ouest | 10 Rosemont-La-Petite-Patrie | 14 Ville-Marie |
| 3 Lachine | 7 Mercier-Hochelaga-Maisonneuve | 11 Saint-Laurent | 15 Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension |
| 4 LaSalle | 8 Pierrefonds-Roxboro | 12 Saint-Léonard | |

Figure 4.6 Distributions des productions d'oxygène (O₂) et de composés organiques volatils (COVs) des arbres de rue

4.8. ENSEMBLE DES SE DANS LE TERRITOIRE D'ÉTUDE ET COMPARAISON AVEC CEUX D'UNE AUTRE ÉTUDE

Les secteurs de recensement du territoire d'étude sont couverts, en moyenne, par 4,27 % de canopée. Cette canopée permet de réduire, en moyenne, de 29 % l'index d'UV (IUV) sous la couronne d'un des arbres qui la compose (*UVOmbre*) et de 5 % sur l'ensemble de ce territoire nonobstant notre localisation (*UVMoyen*) (Tableau 4.11). Les arbres de rue entraveraient, aussi, le ruissellement de 75 703 m³ d'eau et permettraient l'évapotranspiration de 1 623 998 m³ d'eau supplémentaires annuellement. Concernant la qualité de l'air, de l'eau et du sol, 699 850 kg de carbone (C), 446 kg de monoxyde de carbone (CO), 4 722 kg de dioxyde d'azote (NO₂), 5 126 kg d'ozone (O₃), 1 336 kg de particules fines d'origines anthropiques (PM_{2,5}) et 1 432 kg de dioxyde de soufre (SO₂) sont séquestrés de l'atmosphère par an par les arbres de rue dans le territoire d'étude. De plus, ils produisent 1 010 kg d'oxygène (O₂) et 4 207 kg de COVs par année. Enfin, la biomasse des arbres de rue constitue une réserve de carbone de 44 964 900 kg, augmentant chaque année d'environ 699 850 kg selon la séquestration du carbone par an.

Tableau 4.11 Estimation des services écologiques pour l'ensemble du territoire d'étude

Services écologiques	Résultats pour l'ensemble du territoire d'étude	
Canopée	4,27	% (moyenne des SR*)
Réduction des UV dans l'ombre des arbres	29	% (moyenne des SR*)
Réduction des UV moyen	5	% (moyenne des SR*)
Réduction du ruissellement	75 703	m ³ d'eau/an
Potentiel d'évapotranspiration	1 623 998	m ³ d'eau/an
Retrait du CO	446	kg/an
Retrait du NO ₂	4 722	kg/an
Retrait de l'O ₃	5 126	kg/an
Retrait du PM ₂₅	1 336	kg/an
Retrait du SO ₂	1 432	kg/an
Production d'O ₂	1 010	kg/an
Production de COVs totale	4 207	kg/an
Séquestration du C	699 850	kg/an
Dépôt du C	44 964 900	kg

*SR = secteurs de recensement

Pour valider nos résultats de recherche, nous voulions les comparer avec ceux d'autres études montréalaises. Malheureusement, nous avons répertorié une seule étude à Montréal basée sur l'utilisation du logiciel *i-Tree* (Nowak *et al.*, 2018) qui porte toutefois sur l'ensemble du territoire de l'île de Montréal alors que notre étude se limite à 15 arrondissements. À la lecture du Tableau 4.12, nous constatons que les ratios de SE (en tonnes) produits par les arbres de rue aux SE produits par l'ensemble des arbres ne sont pas consistants selon le type de polluants, notamment pour le NO₂ et l'O₃ entre les deux études. Ces écarts pourraient être dus au fait que Nowak *et al.* (2018) utilisent la canopée des arbres (obtenue par la photo-interprétation), tandis que nous utilisons le DHP des arbres ainsi que les essences. Comme nous l'avons mentionné dans la revue de littérature (Section 2.1.1.1), Nowak *et al.* (2018) utilisent un indice de surface foliaire calculé à partir de la photo-interprétation. Notre étude applique plutôt l'indice de surface foliaire propre à chaque essence (Nowak, 1996, 2008). Cette méthode devrait nous octroyer des résultats plus précis que ceux de Nowak *et al.* (2018).

Tableau 4.12 Comparaison entre les résultats de la présente étude et ceux de Nowak *et al.* (2018)

Étude	Unité	CO	NO ₂	O ₃	PM ₂₅	SO ₂
Nowak et al. (2018)	Tonnes	20,3	236,8	986,9	85,4	70,9
Pilon (2018)	Tonnes	0,45	4,72	5,13	1,34	1,43
Ratios de SE (en tonnes) des arbres de rue (par Pilon, 2018) aux SE de tous les arbres (par Nowak et al., 2018)	%	1,99	0,52	1,57	2,02	1,99

Dans la section suivante, nous présentons les corrélations entre les différents SE afin de vérifier s'il est pertinent de calculer autant de SE ou si le simple usage de la canopée suffirait à donner un portrait assez fiable de l'ensemble des SE.

4.9. CORRÉLATION ENTRE LES DIFFÉRENTS SERVICES ÉCOLOGIQUES

Sans surprise, les SE sont significativement et très fortement corrélés entre eux : la valeur de corrélation la plus faible étant de 0,87 (variable *ProdCOVs* avec *UVOmbre* et *UVMoyen*) et les plus fortes de 1 (variable *UVOmbre* avec *UVMoyen*; *Évapotr* avec *Canopée*, *UVMoyen*, *RéductRuiss* et *Retr5Poll*; *ProdO₂* avec *SéqC*), soit des corrélations parfaites. Cela explique pourquoi la cartographie des SE change peu d'un indicateur à l'autre. À la lecture de la matrice de corrélation au Tableau 4.13, il est toutefois possible d'avancer plusieurs constats intéressants.

Tableau 4.13 Corrélations entre les différents services écologiques

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Canopée (%)	1	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,94	0,99	0,87
Réduction des UV dans l'ombre des arbres (%)	2	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99	0,87
Réduction moyenne des UV sur le territoire (%)	3	0,99	1,00	1,00	0,98	0,98	0,98	0,98	0,95	0,98	0,87
Potentiel d'évapotranspiration (m ³ /an/ha)	4	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99	0,93	0,99	0,88
Réduction du ruissellement (m ³ /an/ha)	5	0,99	0,99	0,98	1,00	1,00	0,99	0,99	0,93	0,99	0,90
Retrait du CO, NO ₂ , O ₃ , PM ₂₅ et SO ₂ (tonnes/an/ha)	6	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	1,00	0,98	0,93	0,98	0,88
Séquestration du C (kg/an/ha)	7	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98	1,00	0,96	1,00	0,91
Dépôt du C (kg/ha)	8	0,94	0,95	0,95	0,93	0,93	0,93	0,96	1,00	0,96	0,90
Production d'O ₂ (kg/an/ha)	9	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98	1,00	0,96	1,00	0,91
Production de COVs totale (kg/an/ha)	10	0,87	0,87	0,87	0,88	0,90	0,88	0,91	0,90	0,91	1,00

Tous les coefficients sont significatifs à $p < 0,000$.

Premièrement, les relations entre la production de COVs (*ProdCOVs*) et les autres SE, certaines très fortes (de 0,87 à 0,91), sont un peu plus faibles. Cela peut s'expliquer par l'impact des essences sur la production de pollen : la *ProdCOVs* « depends on tree species, leaf, biomass, air temperature, and other environmental factors » (*i-Tree*, 2017b, p. 87). Prenons l'exemple de l'arrondissement Verdun où les épinettes — de grandes émettrices de pollen d'après nos résultats — sont très présentes. Dans cet arrondissement, la canopée couvre en moyenne 3,82 % des secteurs de recensement (soit une valeur inférieure à 4,36 % de l'ensemble du territoire), alors que la *ProdCOV* s'élève à 0,38 kg par an par hectare, dépassant, ainsi, largement la valeur moyenne de 0,21 pour l'ensemble du territoire.

Deuxièmement, on observe une corrélation parfaite et quasi parfaite (1 et 0,99) entre la canopée et les variables *UvOmbre* et *UvMoyen* (Tableau 4.13). Par contre, Na et al. (2014) démontrent que la canopée et le FPU ne sont pas directement proportionnels malgré qu'ils co-évoluent, car l'utilisation du sol fait varier les FPU. Un manque de précision est induit par le fait que la réduction des rayons UV ne prend pas en compte l'utilisation du sol lors du calcul de l'*UVOmbre* ou de l'*UVMoyen* dans *i-Tree Eco version 6*.

Troisièmement, le *DépôtC* qui repose sur la biomasse des arbres présente aussi des corrélations plus faibles avec les autres SE (de 0,93 à 0,96). Cela s'explique par le fait que la

biomasse des arbres dépend de la structure de la forêt qui à son tour dépend de la composition des essences, de la densité de la forêt et du DHP des arbres (Nowak et Crane, 2002). Dans la suite de logiciels *i-Tree*, l'équation calculant la biomasse de l'arbre de forêt est multipliée par 0,8 pour s'ajuster à la croissance en milieu urbain pour toutes les utilisations du sol (sauf pour les fonctions *vacant* et *wetland* qui sont multipliées par 1). Le choix de cette valeur repose sur la supposition que les arbres grandissent de façon à produire moins de biomasse en milieu urbain qu'en milieu forestier (Henning, 2017; Nowak, 1994). Cela est, toutefois, remis en question par d'autres chercheurs, car les travaux sur ce sujet sont peu nombreux et peu étoffés, en plus d'obtenir des résultats parfois opposés (voir Aguaron et McPherson, 2012). Ces chercheurs d'utiliser une supposition plus neutre – et de garder une valeur de 1 – qui est que la biomasse des arbres urbains se retrouve davantage dans les branches en raison de la disponibilité de l'espace supérieur.

Le précédent ajustement du *DépôtC* selon l'utilisation du sol explique aussi la différence entre ce SE et la séquestration du carbone. Il pourrait sembler étonnant que la quantité de carbone séquestré ne soit pas équivalente au *DépôtC*, soit à la biomasse de l'arbre. Nous expliquons cette différence par le fait que les feuilles caduques ne sont pas prises en compte dans le calcul du *DépôtC* puisqu'elles annuellement (Nowak et Crane, 2002). Ainsi, pour une quantité équivalente de carbone séquestré, le secteur accueillant plus de conifères ou d'arbres à feuilles persistantes (*evergreen*) (inexistant au Québec) aurait un dépôt de carbone supérieur. Elles sont, toutefois, incluses dans le modèle de la séquestration du carbone. Selon nous, le modèle de la séquestration du carbone devrait inclure un coefficient de 1 pour les arbres de forêt et un supérieur à 1 pour les arbres en milieu urbain, car ces derniers présentent un *DépôtC* supérieur dans leur feuille (Xiao, 1998 et Brack, 2002 dans Aguaron et McPherson, 2012). Par conséquent, plus de recherches sont nécessaires pour mieux estimer la croissance des arbres et le *DépôtC* en milieu urbain afin améliorer la modélisation des SE.

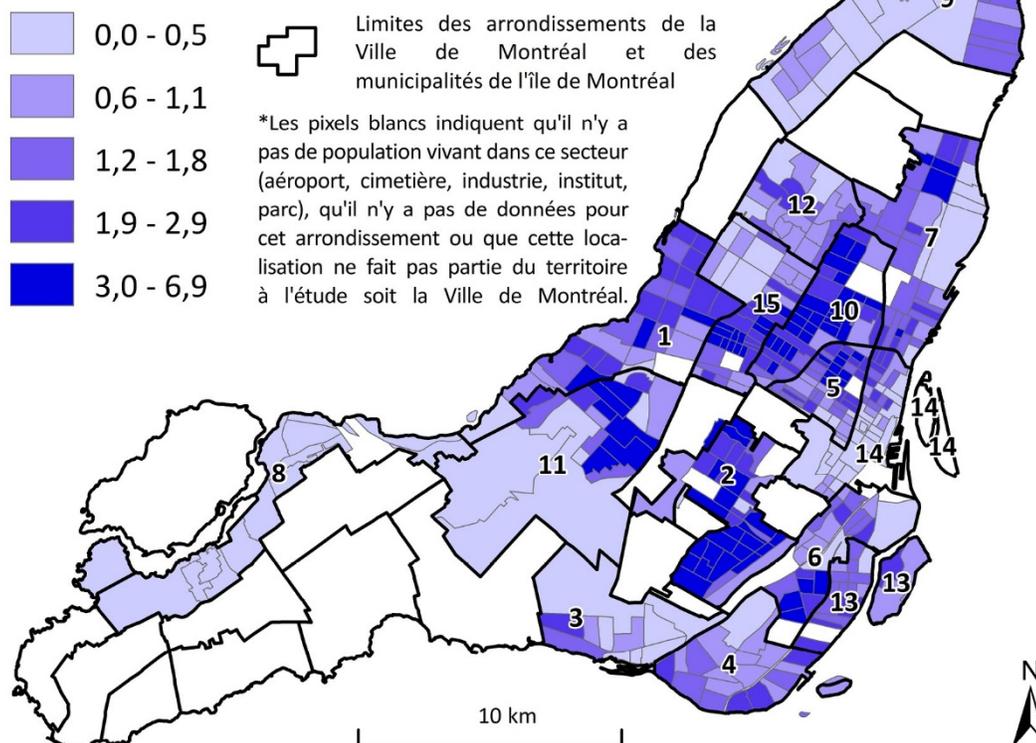
En somme, nous avançons qu'il est pertinent de calculer, en plus de la part du territoire couvert par la canopée, la *ProdCOVs* et le *DépôtC*, car leurs résultats divergent de 4 à 13 % (en termes de coefficients de corrélation) des autres SE. Ces divergences sont dues à leur

méthode de calcul, comme expliqué plus tôt. Les modèles de calcul des autres SE sont à améliorer afin d'être plus précis et utiles, car, s'ils sont parfaitement corrélés (0,98, 0,99 ou 1,00) à la canopée, leur utilité semble s'arrêter à l'estimation de quantité excluant la comparaison entre les entités spatiales ou les essences.

4.10. INDICE COMPOSITE N° 1 : L'ENSEMBLE DES SE

Le fait que les SE soient très fortement corrélées entre eux justifie l'utilisation d'un indice synthétique. Rappelons que l'indice composite est la somme des neuf SE – à l'exception d'*UVMoyen* (voir Section 3.4.3) – qui sont ramenés sur une échelle de 0 à 1 par la normalisation (voir la méthodologie, Section 3.4.2). Cet indice est cartographié à Figure 4.7. Sans surprise, cette carte est très semblable aux précédentes cartes des SE : les secteurs de recensement présentant les valeurs les plus élevées sont situés dans les arrondissements, Rosemont–La-Petite-Patrie, Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Saint-Laurent (partie est), Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension et Le Plateau-Mont-Royal alors que les valeurs les plus faibles sont dans les arrondissements de Pierrefonds–Roxboro, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Lachine, Ville-Marie et Saint-Laurent (partie ouest).

DISTRIBUTION DE L'INDICE COMPOSITE N° 1 : 9 SERVICES ÉCOLOGIQUES À POIDS ÉGAL



La classification suit les quintiles de la distribution de la variable exprimée.
Sources : Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données des arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016; Communauté métropolitaine de Montréal, Utilisation du sol, 2016.
Réalisation : Sources : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic–Cartierville	6 Le Sud-Ouest	11 Saint-Laurent
2 Côte-des-Neiges– Notre-Dame-de-Grâce	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	12 Saint-Léonard
3 Lachine	8 Pierrefonds–Roxboro	13 Verdun
4 LaSalle	9 Rivière-des-Prairies– Pointe-aux-Trembles	14 Ville-Marie
5 Le Plateau-Mont-Royal	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	15 Villeray–Saint-Michel– Parc-Extension

Figure 4.7 Distribution de l'Indice composite n° 1 (SE) : 9 services écologiques à poids égal

4.11. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les valeurs calculées des 10 SE ainsi que leur distribution spatiale dans le territoire d'étude. Concernant la distribution des SE, remarquons que la cartographie des SE à travers les arrondissements se ressemble sauf dans les arrondissements les plus grands. Cela est possiblement dû à la diversité de leurs formes urbaines en raison de l'éventail des périodes de construction sur leur territoire. Nous avons, aussi, discuté des faiblesses du logiciel *iTree-Eco*, en comparant nos résultats avec ceux de Nowak et al. (2018) et avec la littérature. L'inter-corrélation entre les SE fait en sorte que la création d'un indice des SE est pertinente surtout pour leur intégration dans l'Indice composite n° 3 (priorité de plantation) qui sera présenté puis analysé au chapitre suivant.

5. CHAPITRE V : DISPARITÉS, BESOINS ET PRIORITÉS DE PLANTATION

5.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous mettons les quantités de SE en lien avec les besoins de plantation d'arbres, sous trois aspects : disparités dans l'accès aux SE pour les quatre groupes de population (diagnostic d'équité environnementale), présentation des résultats pour l'indice de besoins socioéconomiques et environnementaux (Indice composite n° 2) et celui des niveaux de priorité de plantation (Indice composite n° 3).

Prenons note que le Nord montréalais est utilisé comme référence dans l'ensemble du document, car il correspond mieux à la trame urbaine majoritairement orthogonale de Montréal et, conséquemment, à la représentation du territoire par la population montréalaise. Il s'agit de l'axe formé par la rue Saint-Laurent traversant du Nord-Ouest au Sud-Est l'Île de Montréal.

5.2. CORRÉLATION ENTRE LES SERVICES ÉCOLOGIQUES ET LES POPULATIONS VULNÉRABLES : DIAGNOSTIC D'ÉQUITÉ ENVIRONNEMENTALE

Les corrélations entre chaque SE et les quatre populations estimés vulnérables à Montréal sont analysées pour vérifier l'existence ou non d'iniquités environnementales. De manière générale, nous notons que les SE sont corrélés significativement et négativement avec trois des groupes cibles, soient les pourcentages de minorités visibles, de personnes dans les ménages sous la mesure de faible revenu et d'aînés (Tableau 5.1). Bien entendu, le même constat s'applique à l'indice composite qui, à titre de rappel, est la sommation des neuf SE préalablement ramenés sur une échelle de 0 à 1.

Tableau 5.1 Corrélations entre les services écologiques et la part des populations vulnérables

	0-14 ans	0-19 ans	≥ 65 ans	PMFR	MV	ACP _{VulnSoEc}
Canopée (%)	0,06	0,00	-0,12*	-0,16***	-0,24***	-0,24***
Réduction des UV dans l'ombre des arbres (%)	0,07	0,01	-0,12*	-0,17***	-0,23***	-0,23***
Réduction moyenne des UV sur le territoire (%)	0,07	0,02	-0,11*	-0,18***	-0,22***	-0,24***
Potentiel d'évapotranspiration (m ³ /an/ha)	0,06	0,00	-0,13**	-0,16***	-0,24***	-0,23***
Réduction du ruissellement (m ³ /an/ha)	0,06	0,00	-0,13*	-0,17***	-0,25***	-0,25***
Retrait du CO, NO ₂ , O ₃ , PM ₂₅ et SO ₂ (tonnes/an/ha)	0,07	0,01	-0,12*	-0,16**	-0,23***	-0,23***
Séquestration du C (kg/an/ha)	0,08	0,03	-0,09	-0,17***	-0,21***	-0,22***
Dépôt du C (kg/ha)	0,14***	0,12*	-0,02	-0,19***	-0,14**	-0,19***
Production d'O ₂ (kg/an/ha)	0,08	0,03	-0,09***	-0,17***	-0,21***	-0,22***
Production de COVs totale (kg/an/ha)	0,13**	0,09	-0,02	-0,21***	-0,16***	-0,21***
Indice composite n° 1	0,07	0,02	-0,12*	-0,16***	-0,22***	-0,23***

*p<0,05 **p<0,01 ***p<0,001.

PMFR : personnes dans les ménages sous la mesure de faible revenu (%). MV : minorités visibles (%). ACP_{VulnSoEc} : premier axe de l'ACP réalisé sur les deux variables relatives à la vulnérabilité socioéconomique (PMFR et MV).

Les minorités visibles forment le groupe de population ayant la relation négative la plus importante avec les SE des arbres de rue (par exemple, *Canopée* = -0,24, Indice composite n° 1 = -0,22 avec p<0,001). Les ménages à faible revenu subissent, aussi, cette iniquité, mais moins fortement : les corrélations entre le pourcentage de ce groupe sont de -0,16 (p<0,001) avec la canopée et l'indice composite. Enfin, les aînés sont associés négativement avec la majorité des SE : par exemple, la corrélation entre la canopée et le pourcentage des aînés est seulement de -0,12 (p<0,05), mais non significative avec trois SE (*ProdCOVs*, *DépôtC*, *SéqC*). Cela suggère des iniquités environnementales quant à l'accès aux SE produits par les arbres de rue pour ces trois groupes, surtout les minorités visibles et les personnes à faible revenu, et dans une moindre mesure, les aînés.

Par contre, les ménages à faible revenu habitent dans des secteurs ayant des essences d'arbres produisant moins de COVs puisqu'ils sont davantage corrélés négativement à la *ProdCOVs* qu'à la canopée (PMFR : -0,21, p<0,001 contre -0,16, p<0,001). Pour leur part, les minorités visibles résident dans des secteurs où les essences d'arbres produisent moins de COVs comme on peut le constater en observant que ce groupe de population vulnérable est corrélé moins négativement avec la *ProdCOVs* qu'avec la canopée (-0,16, p<0,001 contre -0,24, p<0,001).

Concernant les enfants, seules deux corrélations avec les SE sont significatives, traduisant ainsi une absence d'iniquité pour ce groupe : *DépôtC* (0,14, $p < 0,001$) et *ProdCOVs* (0,13, $p < 0,01$). Cela corrobore les résultats des études sur le couvert végétal à Montréal soit qu'il y a corrélation positive entre les enfants et la végétation (Apparicio et al., 2016). Toutefois, bien qu'elle soit faible, la corrélation positive avec *ProdCOVs* peut être jugée négativement : les enfants ayant des allergies saisonnières risquent d'être davantage incommodés.

À propos des variations entre les SE, le *DépôtC*, qui représente la taille du tronc (DHP), peut avoir des corrélations assez différentes des autres SE pour une même population vulnérable. Premièrement, il est l'un des deux seuls SE significatifs pour les enfants. Deuxièmement, le *DépôtC* et la *ProdCOVs* ont des corrélations (négatives) un peu plus fortes que les autres SE avec le pourcentage des ménages sous la mesure de faible revenu (-0,18, $p < 0,001$ et -0,19, $p < 0,001$). Troisièmement, la corrélation entre le *DépôtC* et les minorités visibles est plus faible que pour les autres SE, mais encore négative (-0,14, $p < 0,01$ contre de -0,24 à -0,21, $p < 0,001$). Ceci vient du fait que la quantité du *DépôtC* ne découle pas directement de la canopée, et diffère, alors, des autres SE. La différence entre le *DépôtC* et la canopée pourrait être expliquée par deux situations :

- Les arbres de rue dans les secteurs de recensement ayant de forts pourcentages de minorités visibles pourraient appartenir à des essences produisant des troncs plus massifs (*DépôtC* plus grand), mais des couronnes équivalentes (produisant, alors, d'autres SE équivalents). À l'inverse, il se peut que les arbres de rue dans les secteurs ayant de forts pourcentages de ménages à faible revenu appartiennent à des essences produisant de plus grandes couronnes pour des troncs de mêmes tailles.
- Dans les secteurs de recensement où résident davantage les ménages sous la mesure de faible revenu, il y a, peut-être, des arbres un peu plus jeunes (*DépôtC* moins grand). À l'inverse, dans des secteurs de recensement habités par plus de minorités visibles les arbres sont très matures (*DépôtC* plus grand). On peut penser aux quartiers Cartierville et Côte-des-Neiges par exemple. Cette explication basée sur l'âge des arbres est la plus probable. Ces conclusions viennent du fait que le

coefficient de corrélations du *DépôtC* diverge des autres coefficients de SE pour les ménages sous la mesure de faible revenu et les minorités visibles.

En résumé, les corrélations montrent que certains groupes ont un accès plus limité à la canopée de rue et aux SE. Ces constats indiquent l'importance d'identifier les besoins en plantation d'arbres de rue selon la présence de ces groupes de population, ce qui sera adressé dans les prochaines sections.

5.3. IDENTIFICATION DES QUARTIERS EN BESOINS

5.3.1. Besoins socioéconomiques

Rappelons que les besoins socioéconomiques sont calculés selon la part de chacun des groupes de population vulnérable (voir Section 3.4.4). La cartographie des besoins socioéconomiques par secteur de recensement nous révèle quelques tendances importantes (Figure 5.1). Premièrement, les enfants sont davantage concentrés dans deux types de quartiers : en banlieue et dans les arrondissements à l'ouest et au sud-ouest du centre-ville (Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Verdun et Lachine). Deuxièmement, les secteurs ayant de fortes proportions d'aînés suivent presque les mêmes tendances avec quelques exceptions, principalement dans les arrondissements centraux Le Plateau-Mont-Royal et Ville-Marie. Finalement, la distribution spatiale de l'*ACP_{VulnSoEc}* montre que les personnes définies comme vulnérables socioéconomiquement dans cette étude (s'identifiant appartenir à une minorité visible et à un ménage à faible revenu) se trouvent en plus grandes proportions dans les arrondissements Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension, Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Ville-Marie, Saint-Laurent, Saint-Léonard et LaSalle. Toutefois, notons que l'arrondissement Saint-Léonard héberge bien plus de minorités visibles que de personnes dans les ménages à faible revenu. Effectivement, 43 % des Léonardiens appartiennent à une minorité visible et 16 % à un ménage à faible revenu contre 34 % et 19,2 % (selon le SFR) respectivement dans l'ensemble de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2016a, 2016b; Statistique Canada, 2017b).

Remarquons, aussi, comme exception, que les personnes dans les ménages à faible revenu sont très peu présentes (1^{er} quintile) dans la moitié ouest de l'arrondissement Saint-Laurent (Figure 5.1).

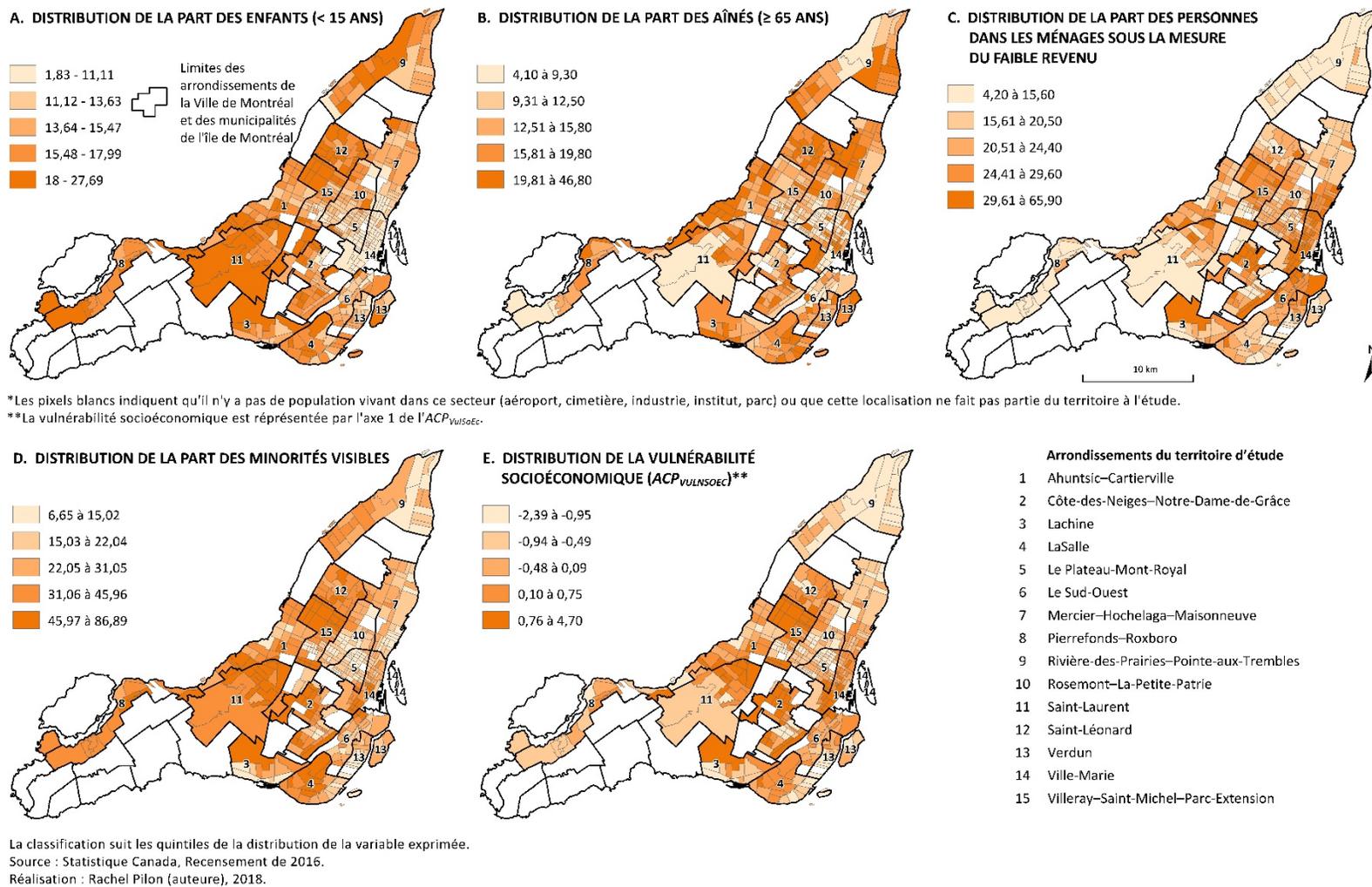


Figure 5.1 Distribution des populations vulnérables

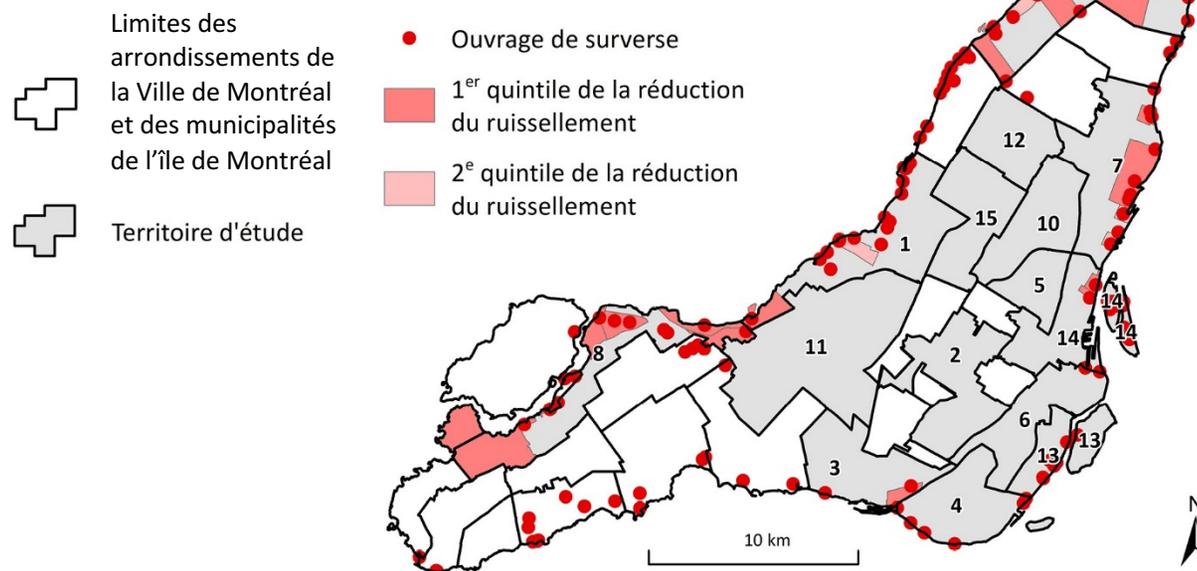
5.3.2. Besoins environnementaux

Tel qu'expliqué dans la méthodologie (voir Section 3.4.5), nous souhaitons identifier les besoins environnementaux en lien avec les SE des arbres de rue. Pour ce faire, nous superposons trois enjeux environnementaux nécessitant une bonne couverture d'arbres et ses SE : les surverses, des nuisances environnementales et les îlots de chaleur.

5.3.2.1. Surverses

À la Figure 5.2, nous présentons uniquement les deux premiers quintiles de la variable *RéductRuiss* pour simplifier la présentation de la spatialisation de cet enjeu. Nos résultats montrent que plusieurs secteurs de recensement en bordure de fleuve ont un rendement en réduction du ruissellement des plus faibles, principalement dans les arrondissements sur la rive nord de l'île, à savoir Ahuntsic–Cartierville, Pierrefonds–Roxboro et Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles (Figure 5.2). Sur la rive sud de l'île de Montréal, on note seulement quelques secteurs de recensement affectés dans l'est, mais plus de secteurs sont atteints dans l'ouest (soit un à Lachine comprenant les écluses du Canal-de-Lachine et la moitié de la zone industrielle de l'arrondissement longeant ce canal).

DISTRIBUTION DES SR ACCUEILLANT UN OUVRAGE DE SURVERSE ET AYANT UNE FAIBLE RÉDUCTION DU RUISSELLEMENT



Sources : Rachel Pilon (auteure), 2018; Ouvrage de surverse, Ville de Montréal, 2016; Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic–Cartierville	5 Le Plateau-Mont-Royal	9 Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	13 Verdun
2 Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	6 Le Sud-Ouest	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	14 Ville-Marie
3 Lachine	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	11 Saint-Laurent	15 Villieray–Saint-Michel–Parc-Extension
4 LaSalle	8 Pierrefonds–Roxboro	12 Saint-Léonard	

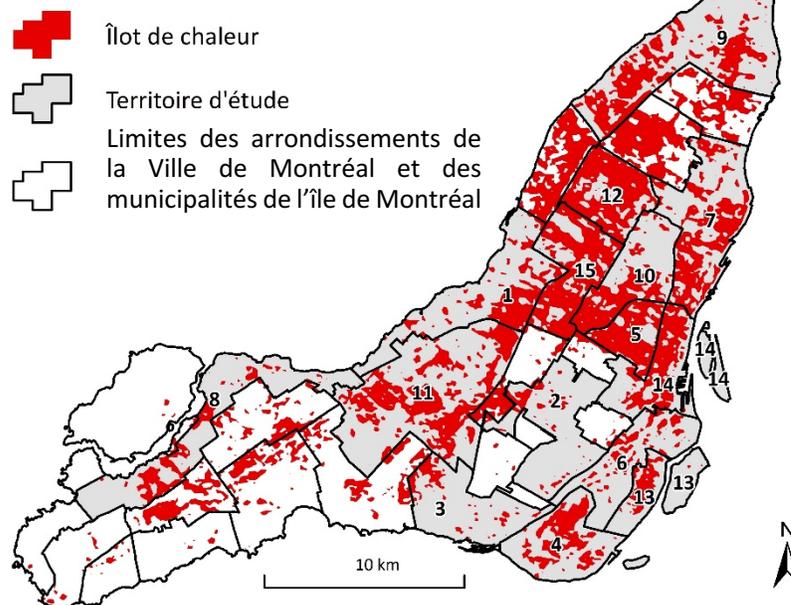
Figure 5.2 Distribution des secteurs de recensement accueillant un ouvrage de surverse et ayant une faible réduction du ruissellement par les arbres de rue

5.3.2.2. Îlots de chaleur

La carte des îlots de chaleur de 2011 montre la présence de la chaleur urbaine dans les quartiers Mercier et Saint-Michel ainsi que les arrondissements LaSalle, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Saint-Laurent, Saint-Léonard et Ville-Marie (voir Figure 5.3).

L'est du quartier Mercier est fortement occupé par des industries, des entrepôts, de grands stationnements, des bâtiments institutionnels, des terrains de sport gazonnés et par le port commercial de Montréal. L'ouest de ce quartier fait aussi mauvaise figure à ce sujet bien qu'il soit résidentiel en raison de la présence de grands terrains vagues. La dernière mise à jour des données dans ce secteur date de 2013. En 2014, un grand projet résidentiel en a utilisé environ la moitié. En date de 2018, on observe des arbres le long des rues bordant ce nouvel ensemble résidentiel. Toutefois, ce sont des arbres privés.

DISTRIBUTION DES ÎLOTS DE CHALEUR



Sources : Rachel Pilon (auteure), 2018; Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016; Collectif de recherche sur les îlots de chaleur, îlots de chaleur (2011), 2017.

Arrondissements du territoire d'étude

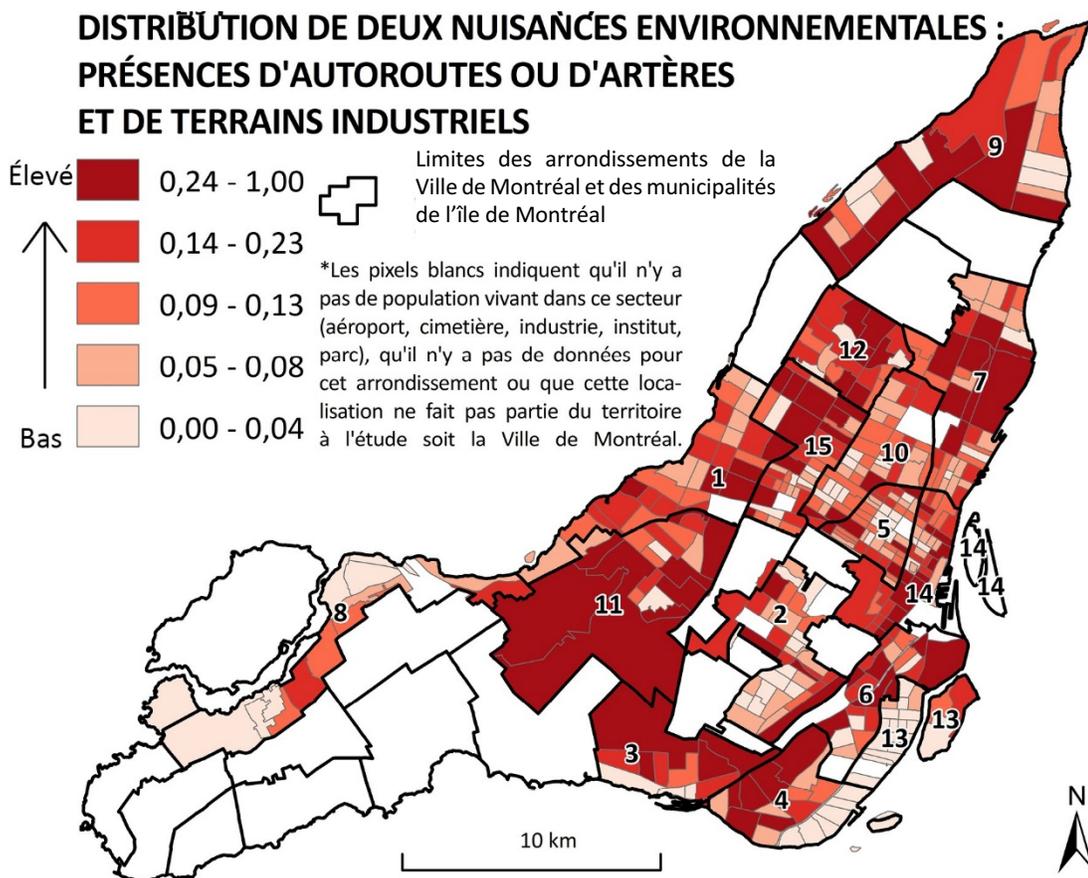
1 Ahuntsic–Cartierville	6 Le Sud-Ouest	11 Saint-Laurent
2 Côte-des-Neiges– Notre-Dame-de-Grâce	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	12 Saint-Léonard
3 Lachine	8 Pierrefonds–Roxboro	13 Verdun
4 LaSalle	9 Rivière-des-Prairies– Pointe-aux-Trembles	14 Ville-Marie
5 Le Plateau-Mont-Royal	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	15 Villeray–Saint-Michel– Parc-Extension

Figure 5.3 Distribution des îlots de chaleur par secteur de recensement

Les arrondissements les plus touchés par les îlots de chaleurs sont les suivants : Le Plateau-Mont-Royal, l'est de Rosemont–La-Petite-Patrie, Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension, Saint-Léonard et Ville-Marie. D'autres arrondissements sont, aussi, touchés, mais dans une moindre mesure. Les raisons principales de l'étendue des îlots de chaleur sont la présence de larges rues, de grandes surfaces, de stationnements, de terrains industriels, de grandes tours d'habitation espacées de surfaces perméables (surtout des stationnements) et, habituellement, de peu de végétation outre de la pelouse.

5.3.2.3. Nuisances environnementales

Les axes de transports majeurs et les industries sont reconnus pour être de grands émetteurs de polluants. Toutefois, elle est peu fréquente dans les arrondissements Ahuntsic–Cartierville, Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Mercier–Hochelaga–Maisonneuve, Pierrefonds–Roxboro, Rosemont–La-Petite-Patrie et Verdun.



Sources : Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Géobase - réseau routier, 2013; Communauté métropolitaine de Montréal, Utilisation du sol, 2016.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic-Cartierville	6 Le Sud-Ouest	11 Saint-Laurent
2 Côte-des-Neiges- Notre-Dame-de-Grâce	7 Mercier-Hochelaga-Maisonneuve	12 Saint-Léonard
3 Lachine	8 Pierrefonds-Roxboro	13 Verdun
4 LaSalle	9 Rivière-des-Prairies- Pointe-aux-Trembles	14 Ville-Marie
5 Le Plateau-Mont-Royal	10 Rosemont-La-Petite-Patrie	15 Villeray-Saint-Michel- Parc-Extension

Figure 5.4 Distribution des deux nuisances environnementales : présences d'autoroutes ou d'artères (2013) et de terrains industriels (2012)

La distribution des enjeux environnementaux précédents expose la pertinence de créer des indices composites prenant en compte les particularités des différents sites. Les Figures 5.2, 5.3 et 5.4 démontrent que la présence d'enjeux environnementaux sur un territoire est plus problématique dans certains arrondissements ou secteur de recensement en raison de leur rendement en différents SE. Premièrement, les arrondissements du nord et de l'est de l'île de Montréal sont plus problématiques que les autres arrondissements riverains. Deuxièmement, tous les arrondissements ont des secteurs de recensement présentant beaucoup de nuisances environnementales (4e ou 5e quintile de la Figure 5.4).

5.4. INDICE COMPOSITE N° 2 : BESOINS EN TERMES SOCIOÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

Pour représenter les besoins à la fois de la population et de son environnement, l'Indice composite n° 2 a été créé. Rappelons que l'Indice composite n° 2 est la somme du nombre d'ouvrages de surverse normalisé (de 0 à 1) et des parts normalisées (de 0 à 1) des 5 facteurs de besoins : enfants, aînés, ACP des ménages à faible revenu et des minorités visibles, îlots de chaleur, ainsi que des nuisances environnementales (autoroute, artère et terrain industriel)¹⁷.

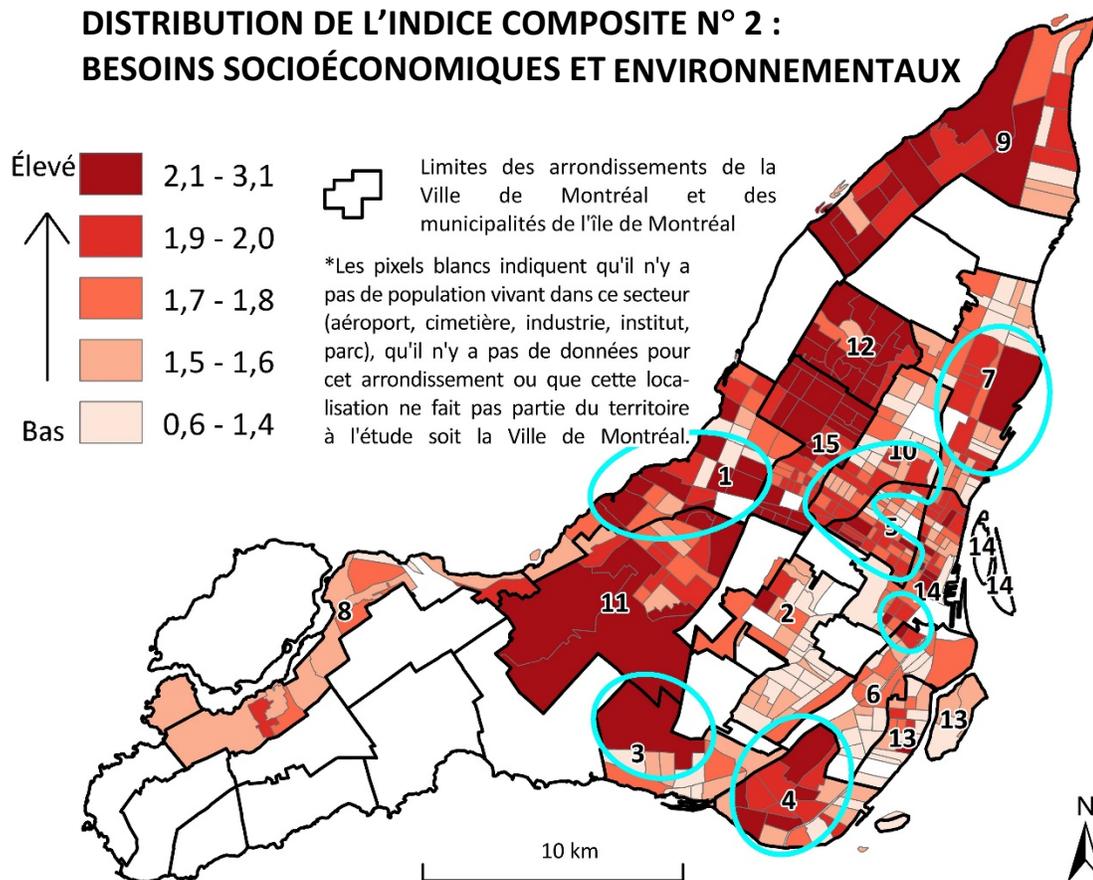
La cartographie de cet indice composite permet alors d'identifier quatre grandes zones où les besoins sont les plus importants : dans les arrondissements Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles (9), Saint-Laurent (11), Saint-Léonard (12), Ville-Marie (14) et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension (15). On y retrouve d'autres zones plus petites dans les arrondissements suivants :

- Ahuntsic–Cartierville : le centre;
- Lachine : le nord;
- LaSalle : le centre, le nord et le sud-ouest;
- Le Plateau-Mont-Royal : la partie ouest (particulièrement le quartier Mile-End) et l'extrême est;

¹⁷ Se référer à la Figure 3.2 du Chapitre 3.

- Mercier–Hochelaga–Maisonneuve : de la rue Sherbrooke Est au fleuve entre le boulevard Pie-IX et la route Transcanadienne;
- Rosemont–La-Petite-Patrie : à l’ouest du boulevard Saint-Michel et
- entre la rue Sherbrooke Ouest et le canal Lachine des rues Peel à du Fort/Georges-Vanier soit à la limite des quartiers Petite-Bourgogne et Golden-Square-Mile des arrondissements Le Sud-Ouest (6) et Ville-Marie (14) (voir les cercles à la Figure 5.5).

DISTRIBUTION DE L'INDICE COMPOSITE N° 2 : BESOINS SOCIOÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX



La classification suit les quintiles de la distribution de la variable exprimée.

Sources : Collectif de recherche sur les îlots de chaleur, Îlots de chaleur (2011), 2017; Ville de Montréal, Géobase - réseau routier, 2013; Ville de Montréal, Ouvrage de surverse, 2016; Communauté métropolitaine de Montréal, Utilisation du sol, 2016; Statistique Canada, Recensement de 2016.
Réalisation : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Arrondissements du territoire d'étude

1 Ahuntsic–Cartierville	6 Le Sud-Ouest	11 Saint-Laurent
2 Côte-des-Neiges– Notre-Dame-de-Grâce	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	12 Saint-Léonard
3 Lachine	8 Pierrefonds–Roxboro	13 Verdun
4 LaSalle	9 Rivière-des-Prairies– Pointe-aux-Trembles	14 Ville-Marie
5 Le Plateau-Mont-Royal	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	15 Villeray–Saint-Michel– Parc-Extension

Figure 5.5 Distribution de l'Indice composite n° 2 : besoins socioéconomiques et environnementaux

5.5. INDICE COMPOSITE N° 3 : PRIORITÉS DE PLANTATION

La Figure 5.6 présente l'Indice composite n° 3, soit le niveau de priorité de plantation des secteurs de recensement selon leur quantité de SE produite et les besoins socioéconomiques et environnementaux. À titre de rappel, l'Indice composite n° 3 est créé en croisant les quintiles de l'Indice composite n° 1 (services écologiques) et de l'Indice composite n° 2 (besoins socioéconomiques et environnementaux).

Il est à noter que les arrondissements Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce et Verdun n'ont aucun secteur de recensement ayant une *priorité de plantation élevée (H)* ou *très élevée (I)*. Pourtant, ils en comptaient quelques-uns d'après l'Indice composite n° 1 et plusieurs suivant l'Indice composite n° 2. Autrement dit, les arrondissements Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce et Verdun n'ont pas de secteurs ayant peu de SE et beaucoup de besoins à la fois.

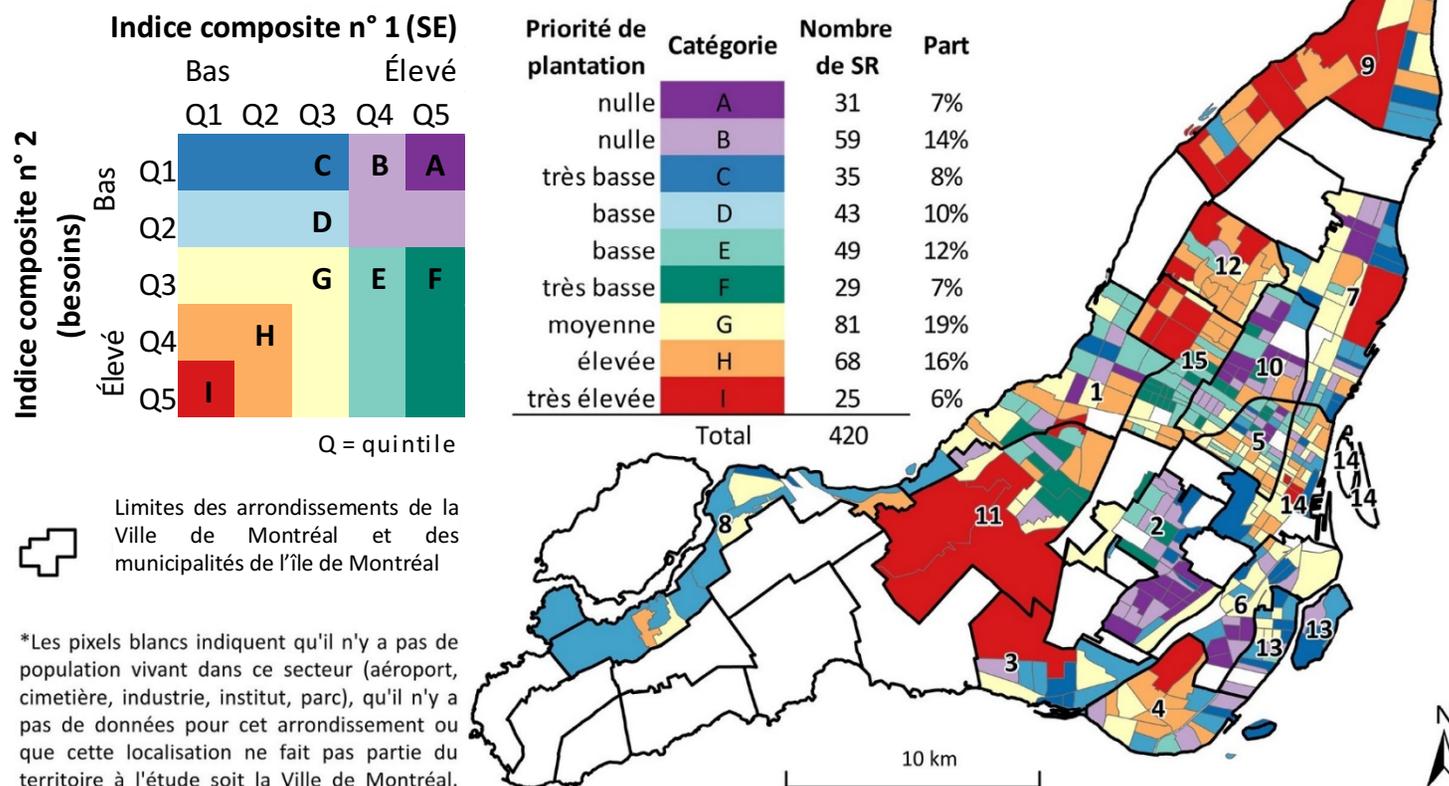
Parmi les 420 secteurs de recensement, du territoire d'étude, 6 % et 16 % appartiennent aux classes de *priorité de plantation élevée (H)* et *très élevée (I)*, respectivement. Ensemble, 22 % des secteurs de recensement du territoire à l'étude, c'est-à-dire 93 secteurs de recensement, nécessiteraient une campagne de plantation accrue dans les rues. La plupart de ces secteurs de recensement se trouvent dans quatre arrondissements (Tableau 5.2). Premièrement, dans l'ouest de Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension, c'est la forte concentration des groupes de population cible (à l'exception des aînés) ainsi que la présence de nuisances environnementales et d'îlots de chaleur qui en font une zone de plantation prioritaire (15 secteurs). Deuxièmement, à Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles (14 secteurs), les zones prioritaires sont expliquées par l'importance de la présence d'enfants combinée à une forte valeur en besoins environnementaux (notamment des risques de surverse et des îlots de chaleur). Troisièmement, à Saint-Léonard (13 secteurs), les zones sont prioritaires compte tenu d'une grande proportion des groupes de population cible (sauf les ménages à faible revenu) et de la présence d'îlots de chaleur. Quatrièmement, l'arrondissement Ville-Marie (12 secteurs) est identifié comme zone de plantation prioritaire en raison de la combinaison des présences d'îlots de chaleur, de voies de transport majeures ainsi que des concentrations de personnes à faible revenu et de minorités visibles dans sa partie ouest ou d'aînés dans sa partie est.

Tableau 5.2 Nombre et pourcentage de secteurs de recensement par classe de l'Indice composite n° 3 par arrondissement¹⁸

Classe/ Arrondissement	NOMBRE ET POURCENTAGE DE SECTEURS DE RECENSEMENT PAR CLASSE DE L'INDICE COMPOSITE N°3 PAR ARRONDISSEMENT										Zones problématiques					
	Zones non problématiques															
	A		B		C		D		E		F	G	H	I		
	nulle		nulle	très basse		basse		basse		très basse	moyenne	élevée	très élevée			
									Priorité de plantation							
1 Ahuntsic–Cartierville	2	7%	3	10%	2	7%	1	3%	9	31%	1	3%	5	17%	1	3%
2 Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	10	26%	14	37%	4	11%	2	5%	3	8%	3	8%	2	5%	0	0%
3 Lachine	0	0%	1	9%	3	27%	4	36%	0	0%	0	0%	2	18%	0	0%
4 LaSalle	0	0%	3	16%	1	5%	3	16%	1	5%	0	0%	2	11%	8	42%
5 Le Plateau Mont Royal	3	6%	5	11%	2	4%	5	11%	10	21%	3	6%	11	23%	8	17%
6 Le Sud-Ouest	4	17%	4	17%	4	17%	3	13%	0	0%	0	0%	7	30%	1	4%
7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	3	8%	5	13%	7	18%	6	16%	3	8%	0	0%	11	29%	2	5%
8 Pierrefonds–Roxboro	0	0%	0	0%	1	8%	7	54%	0	0%	0	0%	3	23%	2	15%
9 Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	0	0%	0	0%	3	13%	3	13%	0	0%	0	0%	3	13%	7	30%
10 Rosemont–La-Petite-Patrie	9	22%	11	27%	0	0%	1	2%	6	15%	7	17%	4	10%	3	7%
11 Saint-Laurent	0	0%	3	16%	0	0%	0	0%	2	11%	4	21%	4	21%	3	16%
12 Saint-Léonard	0	0%	1	5%	0	0%	0	0%	1	5%	0	0%	5	25%	10	50%
13 Verdun	0	0%	4	21%	5	26%	4	21%	1	5%	0	0%	5	26%	0	0%
14 Ville-Marie	0	0%	4	10%	3	8%	4	10%	3	8%	0	0%	13	33%	9	23%
15 Villieray–Saint-Michel–Parc-Extension	0	0%	1	2%	0	0%	0	0%	10	24%	11	27%	4	10%	10	24%

¹⁸ Les pourcentages exprimés représentent la part des secteurs de recensement dans une classe donnée dans l'ensemble des secteurs d'un arrondissement donné. Les pourcentages de l'ensemble du territoire d'étude occupé par chaque classe sont intégrés dans la Figure 5.6.

TYPOLOGIE DES SECTEURS DE RECENSEMENT SELON LA DISTRIBUTION DE L'INDICE COMPOSITE N° 3 : SERVICES ÉCOLOGIQUES, BESOINS SOCIOÉCONOMIQUES ET BESOINS ENVIRONNEMENTAUX



Sources : Statistique Canada, Recensement de 2016; Communauté métropolitaine de Montréal, Utilisation du sol, 2016; Collectif de recherche sur les îlots de chaleur, Îlots de chaleur (2011), 2017; Ville de Montréal, Géobase - réseau routier, 2013; Ville de Montréal, Ouvrage de surverse, 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016.
Réalisation : Rachel Pilon (auteure), 2018.

Figure 5.6 Distribution de l'Indice composite n° 3 : priorité de plantation selon les quintiles de 9 services écologiques et de 6 facteurs de besoins

Cependant, les arrondissements ayant les plus grands pourcentages de leurs secteurs de recensement classés *H* ou *I* (voir les pourcentages au Tableau 5.2) sont Saint-Léonard (65 % de ses secteurs de recensement), Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles (61 %), LaSalle (47 %) et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension (37 %), dans cet ordre d’importance.

En prenant en compte la densité de population, on distingue, parmi les 93 secteurs de recensement classés *H* ou *I*, que le verdissement de certains profiterait à un bien plus grand nombre de personnes. La densité de population moyenne des secteurs de recensement de classes *H* ou *I* est de 7 904 habitants par km². Quelques secteurs de recensement classés *H* ou *I* dans Ahuntsic–Cartierville, Le Plateau-Mont-Royal, Saint-Laurent, Ville-Marie ainsi que Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension ont une densité de population nettement supérieure à cette moyenne, soit entre 11 106 et 50 278 habitants par km². Le verdissement dans ces secteurs, par la plantation des arbres de rue, aurait les impacts les plus substantiels.

La classe *priorité de plantation moyenne (G)* comprend la plus grande part des secteurs de recensement (19 %). Les secteurs de classe *G* sont dispersés dans la ville. Toutefois, on observe qu’ils sont plus fréquents dans les arrondissements Ville-Marie, Le Sud-Ouest et Mercier–Hochelaga–Maisonneuve. Même si le niveau de priorité est moyen, il faudrait planter de manière constante pour anticiper des pertes en arbres dans le futur. Par exemple, il est primordial de projeter la durée de vie de la forêt. L’évaluation des pertes en arbre à anticiper devrait tenir compte de l’âge et de la santé des arbres ainsi que de la vulnérabilité des essences aux maladies et aux parasites, particulièrement à l’agrile du frêne dans le contexte actuel.

Les classes de *priorité de plantation basse à très basse (C, D, E et F)* occupent surtout les arrondissements Lachine, Pierrefonds–Roxboro, Verdun et Ahuntsic–Cartierville, le centre-sud de Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension puis une partie du Rosemont–La-Petite-Patrie et du Plateau-Mont-Royal. Finalement, 21 % des secteurs de recensement ont une *priorité de plantation nulle* (classe *A* ou *B*). Ils se situent majoritairement dans les

arrondissements Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce et Rosemont–La-Petite-Patrie puis, dans une moindre mesure, dans Le Sud-Ouest et dans Mercier–Hochelaga–Maisonneuve.

Concernant la variation à l'intérieur des arrondissements, certains sont homogènes (par exemple, Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce et Verdun) et d'autres comme Saint-Léonard sont très hétérogènes.

5.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, d'abord, nous avons prouvé que les minorités visibles, les personnes dans les ménages à faible revenu et les aînés subissent des iniquités environnementales dans l'accès aux SE. Ensuite, nous avons identifié les secteurs de Montréal ayant le plus de besoins en arbres socioéconomiques et/ou environnementaux (Indice composite n° 2). Enfin, en ajoutant ces besoins (Indice composite n° 2) à la quantité de SE (Indice composite n° 1), 25 zones de *priorité de plantation très élevée (I)* ont été identifiées (Indice composite n° 3). La cartographie de ces zones nous permet de mieux cibler où les campagnes de plantation d'arbres seront les plus bénéfiques.

6. CHAPITRE VI : DISCUSSION ET CONCLUSION

6.1. INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre, nous résumons les résultats les plus importants et ensuite discutons des limites de la méthodologie employée, particulièrement celles relatives au calcul de certains SE. Nous discutons de nos indices composites et des possibilités d'amélioration ou d'ajustement les indices. Nous concluons l'étude avec trois recommandations pour la planification urbaine de Montréal.

6.1. PRINCIPAUX RÉSULTATS

Au chapitre 4, nous avons présenté les calculs de SE qui montrent qu'en moyen les secteurs de recensement ont une canopée des arbres de rue de 4,27 % dans l'ensemble du territoire d'étude. Les arbres de rue contribuent à réduire de 5 % l'index d'UV. Annuellement, les arbres de rue réduisent de 75 703 m³ d'eau et permettraient l'évapotranspiration de 1 623 998 m³ d'eau supplémentaires sur l'ensemble de ce territoire. Ils y retirent de l'atmosphère 699 850 kg de carbone (C), 446 kg de monoxyde de carbone (CO), 4 722 kg de dioxyde d'azote (NO₂), 5 126 kg d'ozone (O₃), 1 336 kg de particules fines d'origines anthropiques (PM_{2,5}) et 1 432 kg de dioxyde de soufre (SO₂) par an. La biomasse des arbres de rue constitue une réserve de carbone de 44 964 900 kg augmentant chaque année d'environ 699 850 kg. Par contre, les SE sont fortement corrélés, ce qui nécessite la création d'un indice composite résumant les variances des SE.

Au Chapitre 5, nous avons prouvé que les minorités visibles, les personnes dans les ménages à faible revenu et les aînés subissent des iniquités environnementales dans l'accès aux SE. Ensuite, nous avons identifié les secteurs de Montréal ayant le plus de besoins en arbres socioéconomiques et/ou environnementaux (Indice composite n° 2). Enfin, en superposant la

carte représentant ces besoins (Indice composite n° 2) à celle de la quantité de SE (Indice composite n° 1), 25 zones de *priorité de plantation très élevée (I)* ont été identifiées (Indice composite n° 3). La cartographie de ces zones nous permet, maintenant, de mieux cibler où les campagnes de plantation d'arbres seront les plus bénéfiques.

6.2. LIMITES RELATIVES AU CALCUL DES SE

6.2.1. Limites liées à la base de données Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal

Premièrement, la présente recherche prend seulement en compte les arbres de rue puisqu'il n'existe pas de répertoire des arbres privés à ce jour, même pour ceux situés en devanture (marge avant des bâtiments). Pourtant, ces derniers contribuent grandement aux SE offerts par la végétation urbaine.

Deuxièmement, il est impossible de savoir si la prise de mesure du DHP des arbres comportant une irrégularité¹⁹ est conforme à la méthode suggérée par *i-Tree*²⁰. Par contre, parmi les irrégularités, les arbres sur un terrain en pente ont été mesurés selon la méthode proposée par *i-Tree*. Troisièmement, nous avons exclu les arbres sans DHP ou sans essence. Par conséquent, les SE risquent d'être sous-estimés pour les secteurs ayant eu une collecte de données moins rigoureuse.

Quatrièmement, de plus amples caractéristiques sur chaque arbre auraient pu améliorer la fiabilité des quantités de SE offerts (*ibid.*). Il est question de sa hauteur totale, de sa hauteur jusqu'à sa cime morte le cas échéant, de la hauteur de son tronc du sol à sa couronne, du diamètre de sa couronne, du pourcentage du volume de sa couronne manquant²¹, de la santé

¹⁹ Par exemple, la présence de deux troncs pour une même souche, un tronc présentant un gonflement en hauteur ou à sa base, la présence d'une branche très basse, un arbre incliné ou poussant dans une pente ou, encore, un arbre déraciné et couché au sol.

²⁰ Pour des exemples d'irrégularités d'un arbre, dans la mesure de son DHP, voir l'*Appendice B*.

²¹ Se référer à *i-Tree* (s. d. a, pp. 30-32).

de sa couronne, c'est-à-dire le pourcentage de branches mortes et le nombre de côtés de sa couronne exposés au soleil (*ibid.*).

6.2.2. Séquestration et dépôt du carbone

L'étude d'Aguaron et McPherson (2012) démontre de grandes différences entre les divers algorithmes calculant la croissance des DHP, la *SéqC* des arbres et, conséquemment, le *DépôtC*. *I-Tree Eco* donne le *DépôtC* le plus conservateur parmi quatre logiciels testés²³ par les précédents auteurs, et ce, probablement en raison de son multiplicateur de 0,8, qui sert à ajuster, au milieu urbain, ses algorithmes de projection de la biomasse de l'arbre (voir Sections 3.3.2 et 4.9) (Aguaron et McPherson, 2012).

6.2.3. Réduction de l'index d'UV moyen et dans l'ombre des arbres

La réduction moyenne des UV (*UVMoyen*) de l'ensemble du secteur de recensement est calculée en supposant que la distance séparant les arbres y est égale. Cette simplification exclut les matériaux de surfaces du sol propre aux différentes utilisations du sol ainsi que l'espacement ou la juxtaposition entre les troncs d'arbre et les canopées. Pourtant, les différentes utilisations du sol sont reconnues pour avoir des parts de matériaux de surface qui leur sont propres (par exemple, Na *et al.*, 2014) (voir Section 4.9). Ainsi, ces résultats ne nous permettent pas de rendre compte de la présence, par exemple, d'îlots urbains à l'intérieur des secteurs de recensement où l'IUV serait très élevé.

Les développeurs d'*i-Tree Eco* pourraient améliorer le calcul de l'*UVMoyen* en retenant les propriétés thermiques des matériaux et les parts habituelles des différents matériaux composant chaque utilisation du sol.

²³ *I-Tree Eco*, *I-Tree Streets*, *CUFR Tree Carbon Calculator (CTCC)* et *Urban General Equation (UGE)*.

6.2.4. Potentiel d'évapotranspiration et réduction du ruissellement

La *RéductRuiss* d'un arbre dépend uniquement de sa surface foliaire (m²) par le logiciel *i-Tree Eco* d'après nos tests (coefficient de corrélation de 0,99; $p < 0,000$). Cependant, cela va à l'encontre des dires des experts selon lesquels certaines essences d'arbres sont plus gourmandes en eau (par exemple, Gravel, 2017).

6.2.5. Retrait du CO, NO₂, O₃, SO₂ et des PM_{2,5}

Il serait intéressant de pouvoir attribuer aux secteurs de recensement des concentrations de polluants qui leur sont propres. Par contre, cela n'est pas encore possible. D'une part, le logiciel *i-Tree Eco version 6* ne nous permet que d'utiliser les données de pollution de l'aéroport Pierre-Elliott-Trudeau pour l'ensemble du territoire d'étude. D'autre part, l'usage de la concentration des polluants pose deux problèmes : 1) la quantité de capteurs de pollution à Montréal est insuffisante et 2) la localisation des capteurs (souvent près des sources de polluants) peut introduire des biais de mesure de polluants. Ces deux derniers problèmes rendent la mesure de la concentration des polluants imprécise.

Plus de recherches sont nécessaires pour raffiner les calculs du retrait des polluants. Par exemple, sachant que la *ProdCOVs* contribue à la formation de l'O₃ et des PM_{2,5} (Morani *et al.*, 2011; Nowak *et al.*, 2014), quelles sont ses répercussions sur la qualité de l'air ? Aussi, quel est l'impact des arbres sur la qualité de l'air sachant qu'ils limitent la dispersion des polluants en réduisant la vitesse du vent puis, conséquemment, la hauteur de la séparation entre les couches d'air chaud et froid (*mixing height*) (Nowak *et al.*, 2013, 2014) ?

Pour rendre compte des désavantages des arbres liés à la qualité de l'air, outre la *ProdCOVs*, le modèle d'*i-Tree Eco version 6* devrait s'enrichir d'un ou de module(s) calculant les effets des variations de l'environnement sur la présence de polluants à l'échelle locale ainsi que sur la production et le relâchement de COVs et de PM par ceux-ci (Nowak *et al.*, 2014).

6.3. PISTES D'AMÉLIORATION DES INDICES COMPOSITES

6.3.1. Choix et pondération des indicateurs

Le choix des indicateurs de nos indices composites pourrait varier selon la disponibilité des données, les besoins spécifiques d'un arrondissement et les objectifs des différents acteurs du verdissement à Montréal. La pondération des indicateurs pourrait, elle aussi, refléter le degré d'importance que ces acteurs attribuent à chacun d'eux. Nous en avons vu deux exemples à la Section 3.4.2. Premièrement, dans son étude sur l'emplacement des zones de plantation potentielles de la ville de New York, Morani *et al.* (2011) accordent plus d'importance à la concentration de la pollution atmosphérique qu'à la densité de population et qu'à la canopée. Deuxièmement, dans leur *Green Infrastructure Spatial Planning (GISP) model* pour Détroit, Meerow et Newell (2017) pondèrent les SE selon l'importance que leur attribuent les acteurs approchés et, parallèlement, selon les paires. Ces partenariats constituent une piste de réflexion à la poursuite de notre étude.

6.3.2. Comparaison de nos indices composites avec ceux d'autres études

Nous aurions aimé enrichir notre Indice composite n° 1 de l'accessibilité aux parcs par la distance à parcourir pour s'y rendre (par exemple, Boone *et al.*, 2009; Carrier *et al.*, 2016a; Meerow et Newell, 2017) et par le nombre d'habitants par km² de parc (Boone *et al.*, 2009). Additionnés à la part de la canopée (%) déjà calculée, ces deux indicateurs pourraient constituer un indice de départ pour évaluer les SE culturels.

Comme Carrier *et al.* (2016a), nous aurions aimé inclure la distribution de la concentration du NO₂ à notre Indice composite n° 2. Cependant, la cartographie du NO₂ de Crouse, Goldberg et Ross (2009), trois professeurs de l'Université McGill (Montréal), utilisée par Carrier *et al.* (2016a) commence à dater (2006) et ne connaît pas de remplacement jusqu'à présent. Morani *et al.* (2011) ont ajouté la densité de population à même l'indice composite. Cet ajout risque, cependant, d'écarter les secteurs aux besoins criants, mais à faible densité à cause de

la présence des sites industriels ou des artères. Enfin, nous sommes conscients que le portrait des besoins pourra changer avec l'ajout des arbres privés et de parc.

6.4. RECOMMANDATIONS

À la lumière de nos résultats sur les SE, cinq recommandations peuvent être formulées :

1. La réduction du ruissellement doit être bonifiée dans les quartiers riverains majoritairement au nord et à l'est de la Ville de Montréal. Nous suggérons d'y planter des arbres gourmands en eau comme les saules. Cette essence qui est favorisée pour la décontamination (Gravel, 2017) pourrait, alors, aussi réduire la contamination du sol et de l'eau causée par les surverses. Nous sommes arrivés à cette conclusion en superposant les secteurs de recensement accueillant un ouvrage de surverse et ayant une faible réduction du ruissellement soit les secteurs de recensement faisant partie du premier et du second quintile de réduction du ruissellement (voir Section 5.3.2.1).
2. Le retrait des polluants et la séquestration du carbone nécessitent d'être augmentés à proximité des émetteurs de pollution (autoroutes, artères et industries) par la plantation d'arbres.
3. Des budgets de verdissement substantiels pourraient être accordés aux arrondissements Saint-Laurent, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Saint-Léonard et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension car ils sont les principaux détenteurs de secteurs de recensement classés *priorité de plantation élevée (H)* et *très élevée (I)*.

En conclusion, l'outil développé dans cette étude (notamment les indices composites) pourrait être modulé et modifié selon les besoins locaux de chaque territoire. Nos résultats contribuent à revoir l'opérationnalisation des SE dans les domaines de la planification et du verdissement en milieu urbain, dépassant, ainsi, l'usage du concept en sensibilisation et en éducation publique.

7. ANNEXE A : BASE DE DONNÉES ET UTILISATION D'*I-TREE ECO*

7.1. DONNÉES DES ARBRES PUBLICS DE LA VILLE DE MONTRÉAL

Une fois structurée, voici la base de données sur les arbres qui a été utilisée dans *i-Tree*. Elle comprend plusieurs champs qui sont décrits ci-dessous.

7.1.1. Identifiant (numéro unique pour chaque arbre)

Un nouvel identifiant est attribué aux entités, car nous avons exclu les arbres de parcs de la base de données.

7.1.2. SR (secteur de recensement)

Le champ SR est rajouté à la base de données pour identifier le secteur de recensement dans lequel est localisé l'arbre de rue.

7.1.3. Sigle

Les sigles de la base de données des arbres publics initiale — soit le répertoire des sigles employé par la Ville de Montréal — ont dû être corrigés puis transformés pour correspondre à ceux d'*i-Tree*. En effet, il n'existe pas encore de système unique ressortant à l'international pour codifier les essences. Voici ces étapes de corrections et de transformation :

1. Les noms latins des essences subissent une première tentative de correction par la comparaison avec un répertoire de noms d'essences retrouvées au Québec rectifiés par Pierre-Antoine Bouliane, un collaborateur du projet.

2. Les sigles et les noms latins de la Ville de Montréal ayant subi une première correction sont, ensuite, comparés à ceux d'*i-Tree* pour en faire ressortir ceux qui ont le même sigle pour le même nom latin.
3. Les essences de la Ville sans correspondance dans *i-Tree* reçoivent une seconde tentative de correction en étant entrées dans les outils de recherche *Seed Information Database* et *Taxonomic Name Resolution Services* des sites Web de *Kew Royal Botanical Gardens* et *iPlant Collaborative* respectivement pour trouver les erreurs de frappe et les synonymes du nom de ces essences.
4. L'étape 2 est reconduite avec les noms d'essences corrigées à l'étape précédente (3) et leur sigle.
5. Les noms d'essences de la Ville toujours sans correspondance dans *i-Tree* sont réduits au genre. Autrement dit, le nom du cultivar est retiré du nom latin de l'essence pour en garder uniquement le genre et la famille.
6. L'étape 2 est, une dernière fois, reconduite avec les noms d'essences corrigées à l'étape précédente (5) et leur sigle.

7.1.4. Land Use

Ce champ permet d'identifier l'utilisation du sol dans lequel est situé l'arbre.

7.1.5. DHP 1 (cm) : DHP

Aucune modification n'est apportée à ce champ, car il correspond déjà à la mise en forme exigée par *i-Tree*. Toutefois, nous avons corrigé le DHP de deux arbres puisqu'ils affichaient un DHP supérieur à 254 cm soit à la limite après laquelle le logiciel réduit à cette taille les DHPs excédant cette mesure pour la *DépotC* et la *SéqC*. Suite à une vérification de ces deux arbres sur *Google Street View* grâce à leurs positions géographiques fournies à même la base de données, nous avons réalisé que les décimales avaient fort probablement été mal écrites. Alors, nous avons déplacé la virgule dans ces deux nombres.

7.1.6. Street tree ? et Publics ?

Tous les arbres se sont vu attribuer la caractéristique « sur rue » (*Yes to Street tree ?*) et « public » (*Yes to Publics ?*) lors de l'importation de la base de données dans le logiciel *i-Tree*, car les arbres de parcs et de copropriété avaient déjà été retirés de la base de données lors de l'extraction des arbres de rue.

7.1.7. Utility Conflict

En raison du vaste nombre d'attributs au champ *Obstacle*, les possibilités d'attributs pour ce champ sont réduites à deux nouveaux attributs correspondant le mieux à l'attribut original s'il n'était pas nul : « Autre » et « Fils ».

7.1.8. Latitude

Coord_Y

7.1.9. Longitude

Coord_X

7.2. UTILISATION DU LOGICIEL *I-TREE ECO VERSION 6* POUR CALCULER LES SERVICES ÉCOLOGIQUES

Ci-dessous se trouve la procédure à suivre pour l'usage d'*i-Tree Eco version 6* puis une capture d'écran du logiciel témoignant de sa simplicité d'utilisation en raison de son interface conviviale. De plus, une présentation automatique des résultats comprenant des graphiques et un texte d'accompagnement facile leur analyse.

1. S'enregistrer à des fins de promotion du logiciel et pour recevoir les résultats, car les données sont traitées sur le serveur des concepteurs en Oregon avant d'être renvoyer sous forme de résultats par courriel.
2. Commencer un projet en choisissant la zone d'étude et la série dont elle fait partie s'il est question d'un inventaire complet. Dans cette étude, nous prenons les

arrondissements de la série nommée « Ville de Montréal ». Effectivement, la base de données, comprenant l'ensemble des arbres du territoire d'étude, a dû être subdivisée par arrondissement, car elle était trop volumineuse pour son importation dans le logiciel. Cette situation a considérablement augmenté le temps de traitement des données.

3. Sélectionner des données temporelles et de localisation dans des menus déroulants.
4. Créer manuellement les couches géographiques que l'on désire utilisées. Dans notre cas, il s'agit des secteurs de recensement.
5. Importer le fichier de la base de données.
6. S'assurer de la concordance des attributs de la base de données avec les options du logiciel et observer le nombre d'arbres qui seront retirés de la base de données, car ils n'ont pas de taille de DHPs (attribut = 0) ou d'essence (attribut = AAAA) en raison de la qualité de la collecte de données par la Ville de Montréal. La concordance de deux champs d'*i-Tree Eco version 6* a dû être faite manuellement. Dans le cas de la présente étude, nous avons retenu et, alors, fait concorder, les caractéristiques des arbres suivantes :
 - a. Identifiant (numéro unique pour chaque arbre)
 - b. Stratum : secteur de recensement
 - c. Species : Sigle
 - d. Land Use
 - e. DHP 1 (cm) : DHP
 - f. *Street tree ?*
 - g. *Utility Conflict*

Les attributs « Autre » et « Fils » du champ *Obstacle* de la Ville de Montréal se voient attribuer « Present and Conflicting » au champ *i-Tree Utility Conflict* tandis que les entités sans attributs pour ce champ ont obtenu « No lines ».

h. *Public ?*

Toutes les entités ont reçu la caractéristique « public » (*Yes to Publics ?*).

i. Latitude

j. Longitude

7. Finalement, il y a possibilité d'ajouter des observations (des arbres) et des couches de données à même le logiciel ou en modifiant la base de données et en la réimportant. Par contre, il faudra resoumettre les données au processeur puis attendre à nouveau de recevoir les résultats ce qui prend environ une heure et demie.

Il est possible de soutirer des résultats du logiciel en fournissant uniquement les caractéristiques de base des arbres et de leur environnement. Toutefois, au moment de lancer les résultats — soit à la fin de la procédure d'entrer des données — le logiciel recommande d'ajouter certains sous-indicateurs pour augmenter la justesse des résultats. Il détaille l'impact de l'absence de ces informations sur la précision des résultats et les opportunités ratées. Les captures d'écran de l'interface ci-après (Figures 7.1 et 7.2), nous donnent un aperçu de l'entrée des données optionnelles.

[Project: test] [Series: 17fev] [Year: 2017] - i-Tree Eco v6.0.3

File Project Configuration Data View Reports Forecast Support

Paper Form Submit to Mobile Retrieve from Mobile Import Trees Check Data CSV KML Benefit Prices Annual Costs Editing Mode: Off

Data Collection Inventory Data Export Inventory Value

Help

Data > Inventory Value > Annual Costs

The Annual Costs field seen in the action panel to the right identifies the costs associated with your project. The costs entered here and the urban forest benefits estimated by Eco are used to calculate the benefit-cost ratio of those benefits, which can be a valuable public-policy tool. If you are interested in comparing the benefits and costs of your urban forest, you will need to gather annual cost data for your study area (see Notes below).

There are no default costs for this field because they can vary significantly from place to place. The values that you provide here are primarily the annual costs associated with

Data > Inventory Value > Annual Costs

Enter the costs associated with your project OK

	Public Can\$ (CAD)	Private Can\$ (CAD)	Total Can\$ (CAD)
Planting Can\$ (CAD)	0	0	0
Pruning Can\$ (CAD)	0	0	0
Tree Removal Can\$ (CAD)	0	0	0
Pest Control Can\$ (CAD)	0	0	0
Irrigation Can\$ (CAD)	0	0	0
Repair Can\$ (CAD)	0	0	0
Cleanup Can\$ (CAD)	0	0	0
Legal Can\$ (CAD)	0	0	0
Administrative Can\$ (CAD)	0	0	0
Inspection Can\$ (CAD)	0	0	0
Other Can\$ (CAD)	0	0	0
Total Costs Can\$ (CAD)	0	0	0

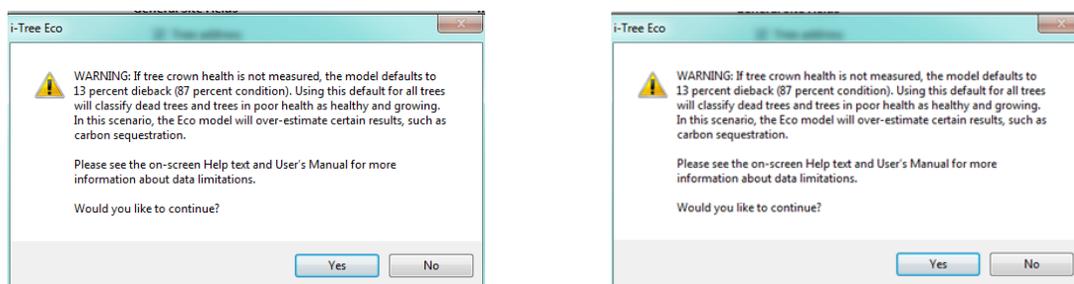
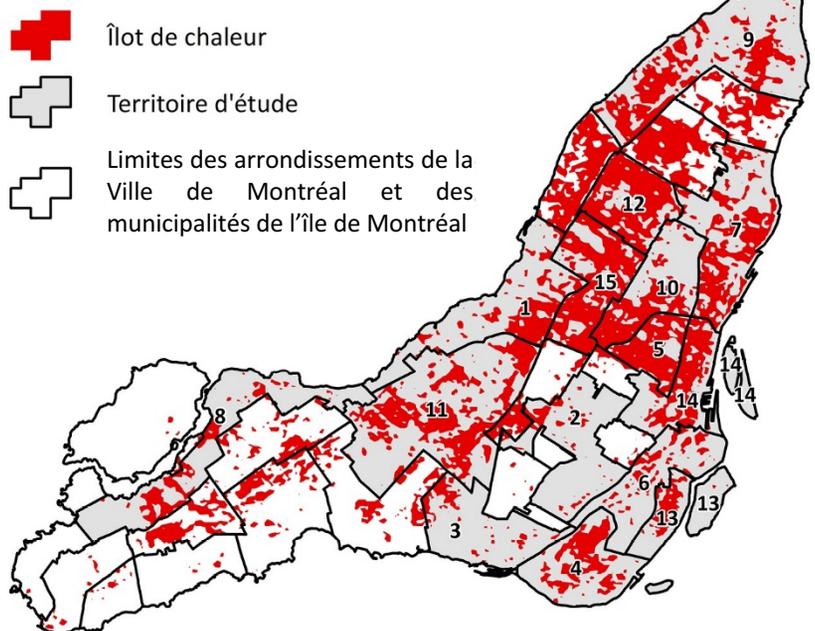
Figure 7.1 Interface du logiciel *i-Tree Eco* version 6

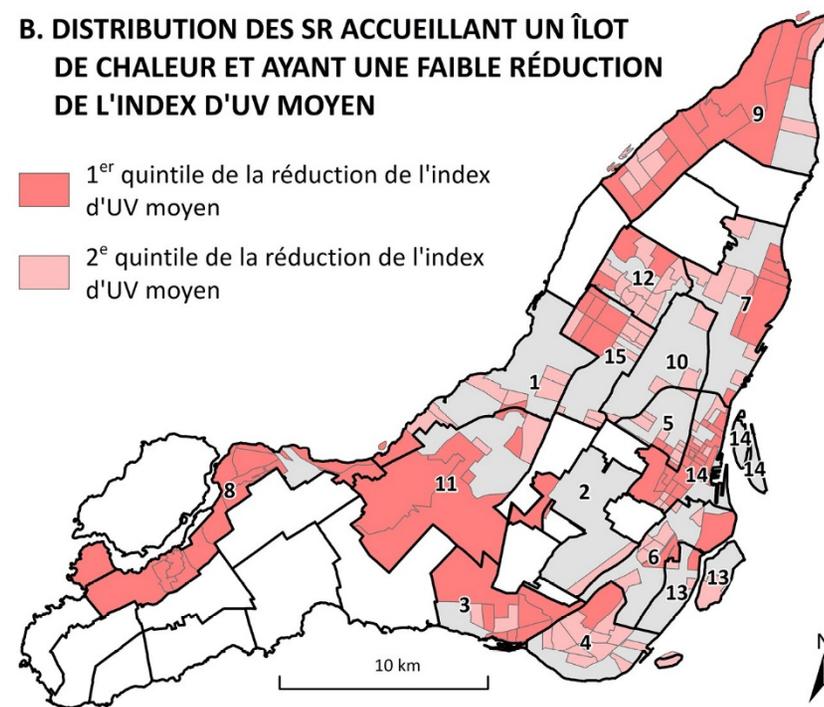
Figure 7.2 Avantage d'ajouter les couches d'information « usage du sol » (gauche) et « coûts annuels » (droite)

8. ANNEXE B :
COMPLÉMENT SUR LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX UTILISÉS COMME INDICATEURS
DES BESOINS ENVIRONNEMENTAUX

A. DISTRIBUTION DES ÎLOTS DE CHALEUR



B. DISTRIBUTION DES SR ACCUEILLANT UN ÎLOT DE CHALEUR ET AYANT UNE FAIBLE RÉDUCTION DE L'INDEX D'UV MOYEN



Sources : Rachel Pilon (auteure), 2018; Statistique Canada, Recensement de 2016; Ville de Montréal, Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016; Collectif de recherche sur les îlots de chaleur, Îlots de chaleur (2011), 2017.

Arrondissements du territoire d'étude

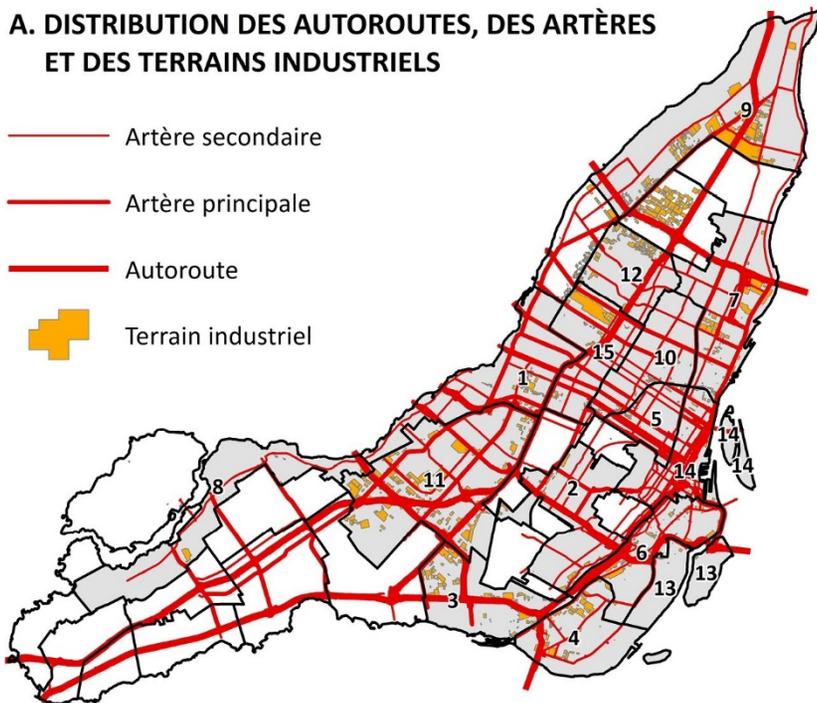
1 Ahuntsic–Cartierville	5 Le Plateau–Mont-Royal	9 Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	13 Verdun
2 Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	6 Le Sud-Ouest	10 Rosemont–La-Petite-Patrie	14 Ville-Marie
3 Lachine	7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve	11 Saint-Laurent	15 Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension
4 LaSalle	8 Pierrefonds–Roxboro	12 Saint-Léonard	

Figure 8.1 Distribution des îlots de chaleur (2011) (A) puis des secteurs de recensement accueillant un îlot de chaleur et ayant une faible réduction de l'index de rayons ultraviolets (UV) par les arbres de rue (B)

*SR = secteurs de recensement

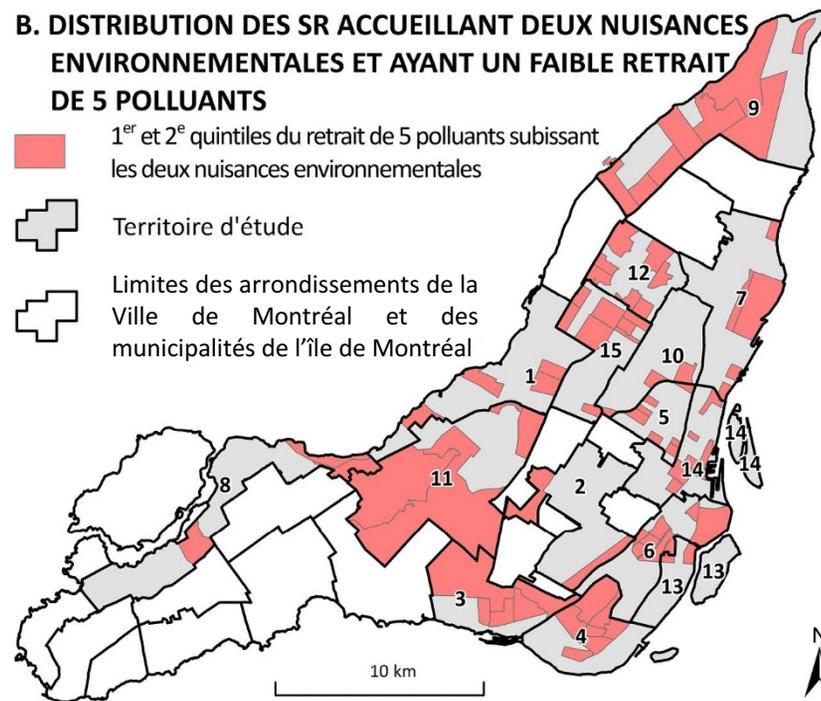
A. DISTRIBUTION DES AUTOROUTES, DES ARTÈRES ET DES TERRAINS INDUSTRIELS

-  Artère secondaire
-  Artère principale
-  Autoroute
-  Terrain industriel



B. DISTRIBUTION DES SR ACCUEILLANT DEUX NUISANCES ENVIRONNEMENTALES ET AYANT UN FAIBLE RETRAIT DE 5 POLLUANTS

-  1^{er} et 2^e quintiles du retrait de 5 polluants subissant les deux nuisances environnementales
-  Territoire d'étude
-  Limites des arrondissements de la Ville de Montréal et des municipalités de l'île de Montréal



Sources : Rachel Pilon (auteure), 2018; Statistique Canada, Recensement de 2016; Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal, 2016; Ville de Montréal, Géobase - réseau routier, 2013; Communauté métropolitaine de Montréal, Utilisation du sol, 2016.

Arrondissements du territoire d'étude

- | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|--|---|
| 1 Ahuntsic–Cartierville | 5 Le Plateau-Mont-Royal | 9 Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles | 13 Verdun |
| 2 Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce | 6 Le Sud-Ouest | 10 Rosemont–La-Petite-Patrie | 14 Ville-Marie |
| 3 Lachine | 7 Mercier–Hochelaga–Maisonneuve | 11 Saint-Laurent | 15 Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension |
| 4 LaSalle | 8 Pierrefonds–Roxboro | 12 Saint-Léonard | |

Figure 8.2 Distribution des autoroutes, des artères (2013) et des industries (2012) (A) puis des secteurs de recensement accueillant ces deux nuisances environnementales et ayant un faible retrait du CO, NO₂, O₃, SO₂ et des PM_{2,5} par les arbres de rue (B)

*SR = secteurs de recensement

9. APPENDICE A : LES BÉNÉFICES TIRÉS DES ÉCOSYSTÈMES ET LEURS LIENS AVEC LE BIEN-ÊTRE DE L'HOMME

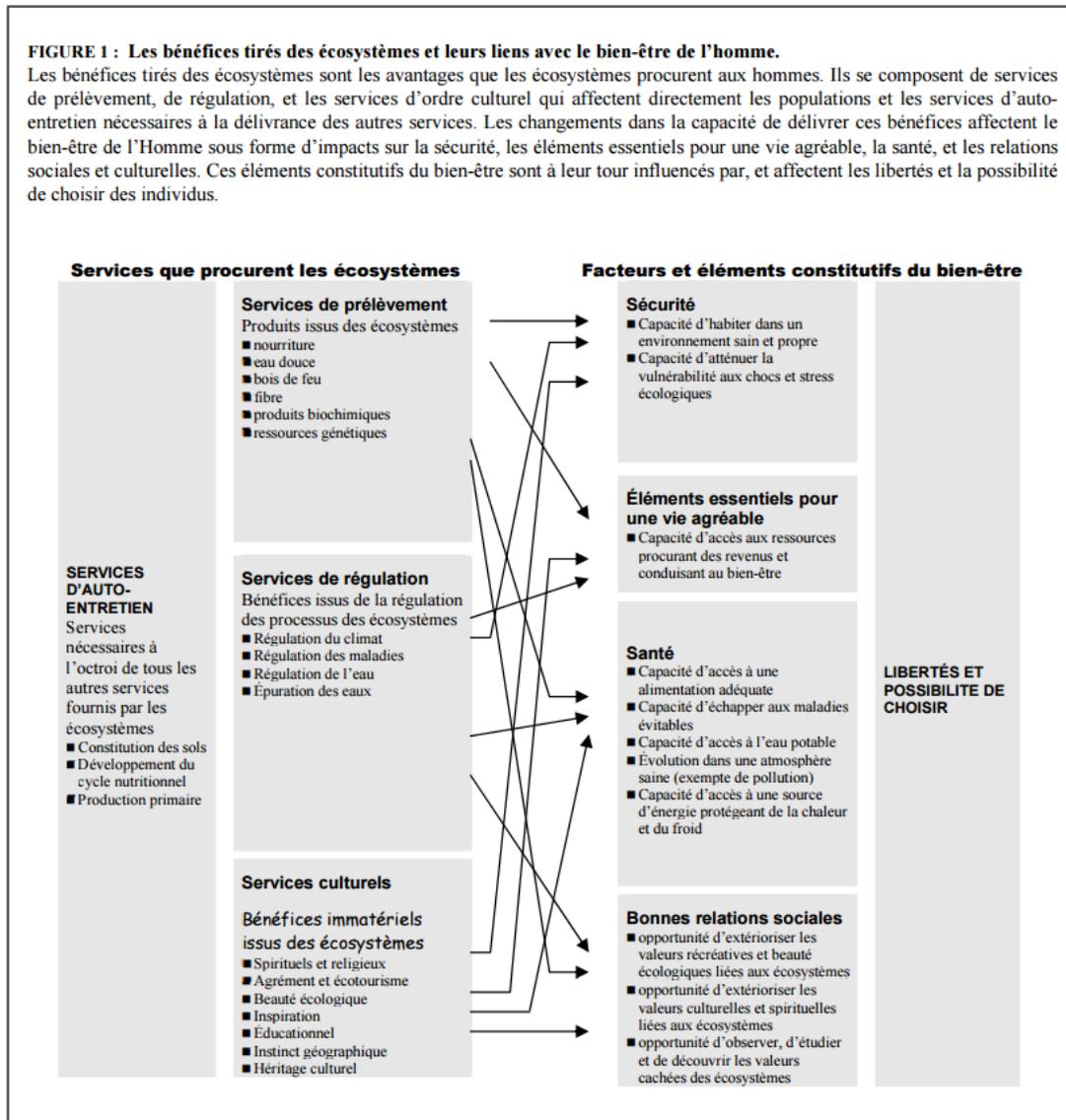


Figure 9.1 Appendice A : capture de MEA, 2003, p. 11 (p. 3).

10.APPENDICE B : EXEMPLES D'IRRÉGULARITÉS D'UN ARBRE DANS LA MESURE DE SON DHP

DBH Special Cases

Forked (multi-stemmed) tree: If the point of pith separation is above ground (Fig. 6), the plant is considered to be one tree. Measure the DBH of up to six stems separately. If the tree has more than six stems with DBH ≥ 1 inch, lower the measurement height to 1 ft above the ground and record the diameter of up to six stems (selecting the largest and ignoring any others). If the pith union is below ground, each stem is considered a separate tree (included bark down to ground line is a good indicator that pith union is below ground).

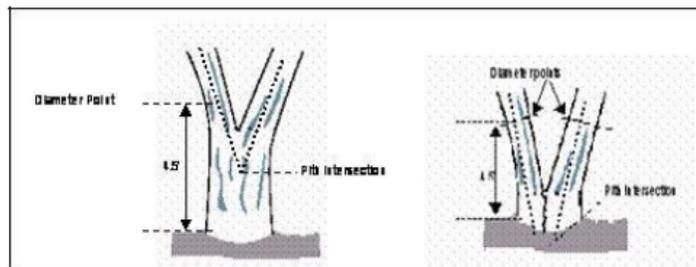


Figure 6—Measuring DBH in forked (multi-stemmed) trees.

Root sprouts: Any root sprouts with DBH ≥ 1 inch should be measured as separate trees. Root sprouts with DBH < 1 inch can be ignored.

DBH Special Cases—continued

Tree with butt-swell or bottleneck: Measure these trees 1.5 ft above the end of the swell or bottleneck if the swell or bottleneck extends 3.0 ft or more above the ground.

Tree with irregularities at DBH: On trees with swellings, bumps, depressions, or branches at DBH height, diameter will be measured immediately above the irregularity at the place it ceases to affect normal stem form.

Tree on slope: Measure diameter at 4.5 ft from the ground along the bole on the uphill side of the tree.

Leaning tree: Measure diameter at 4.5 ft from the ground along the bole. The 4.5 ft distance is measured along the underside face of the bole.

Live windthrown tree: Measure from the top of the root collar along the length to 4.5 ft.

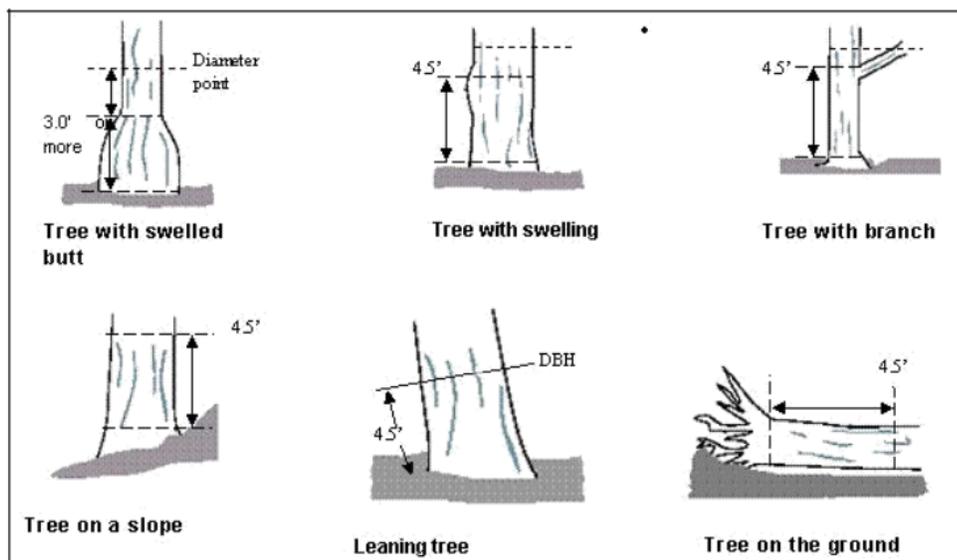


Figure 7—Measuring DBH in trees with irregularities.

Figure 10.2 *Appendice B partie 2 : capture d'i-Tree*, 2017a, p. 37.

11. BIBLIOGRAPHIE

- Aguaron, E. et McPherson, E. G. (2012). Comparison of Methods for Estimating Carbon Dioxide Storage by Sacramento's Urban Forest. Dans R. Lal et B. Augustin (dir.), *Carbon Sequestration in Urban Ecosystems* (chap. 3, p. 43-71). Dordrecht : Springer Netherlands.
- Alam, M., Dupras, J. et Messier, C. (2016). A framework towards a composite indicator for urban ecosystem services. *Ecological Indicators*, (60), 38-44.
- André, P. et Gagné, J.-P. (1997, octobre). *Atténuation du bruit routier en milieu résidentiel dense. Revue et analyse de la littérature*. [Rapport de recherche produit pour le compte du ministère des Transports du Québec, Direction de l'Île-de-Montréal]. Montréal : Université de Montréal.
- Apparicio, P., Pham, T.-T.-H., Séguin, A.-M. et Dubé, J. (2016, novembre). Spatial distribution of vegetation in and around city blocks on the Island of Montreal: A double environmental inequity? *Applied Geography*, 76, 128-136. doi: 10.1016/j.apgeog.2016.09.023.
- Apparicio, P., Pham, T.-T.-H., Séguin, A.-M. et Landry, S. (2013). Équité environnementale et distribution spatiale de la végétation à l'intérieur et autour des îlots résidentiels à Montréal : une double iniquité ? *Cahiers de géographie du Québec*, 57(161), 215-237. doi: 10.7202/1024902ar.
- Bissonnette, J.-F., Dupras, J., Messier, C., Lechowicz, M., Dagenais, D., Paquette, A., Jaeger, J. et Gonzalez, A. (2018). Moving forward in implementing green infrastructures: Stakeholder perceptions of opportunities and obstacles in a major North American metropolitan area. *Cities*, (81), 61-70.
- Blais, P., Boucher, I. et Caron, A. (2012). *L'Urbanisme durable : Enjeux, pratiques et outils d'intervention*. PDF en ligne : ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire du Québec (MAMOT). Récupéré en novembre et décembre 2015 de mamrot.gouv.qc.ca/pub/grands_dossiers/developpement_durable/guide_urbanisme_durable.pdf.
- Blanchon, D., Moreau, S. et Veyret, Y. (2009). Comprendre et construire la justice environnementale. *Annales de géographie*, 1-2(665-666), 35-60.

- Boone, C. G., Buckley, G. L., Grove, J. M. et Sister, C. (2009, 17 septembre). Parks and People: An Environmental Justice Inquiry in Baltimore, Maryland. *Annals of the Association of American Geographers*, 99(4), 767-787. doi: 10.1080/00045600903102949.
- Carrier, M. (2015, 2 mars). La Distribution des polluants atmosphériques et du bruit provenant du transport routier dans les milieux résidentiels de l'île de Montréal: un cas d'équité environnementale. (Thèse de doctorat en études urbaines). Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec. PDF en ligne. Récupéré en janvier 2019 de <http://espace.inrs.ca/3324>.
- Carrier, M., Apparicio, P., Kestens, Y., Séguin, A.-M., Pham, T.-T.-H., Crouse, D. et Siemiatycki, J. (2016a, 1er octobre). Application of a Global Environmental Equity Index in Montreal: Diagnostic and Further Implications. *Annals of the American Association of Geographers*, 106(6), 1268-1285. doi: 10.1080/24694452.2016.1197766.
- Carrier, M., Apparicio, P. et Séguin, A.-M. (2016b, 1er février). Road traffic noise in Montreal and environmental equity: What is the situation for the most vulnerable population groups? *Journal of Transport Geography*, 51(Supplement C), 1-8. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2015.10.020.
- Carrier, M., Apparicio, P., Séguin, A.-M. et Crouse, D. (2014, 1er septembre). Ambient air pollution concentration in Montreal and environmental equity: Are children at risk at school? *Case Studies on Transport Policy*, (2), 61-69. doi: 10.1016/j.cstp.2014.06.003.
- Collectif de recherche sur les îlots de chaleur. (2011). [Base de données]. En ligne : Ville de Montréal : Portail données ouvertes. Récupéré en mai 2018 de <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset>.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2016). [Base de données]. En ligne. Récupéré en 2017 de www.cmm.qc.ca/donnees-et-territoire/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/donnees-georeferencees.
- Côté, É. (2006, septembre). *Diagnostic local de sécurité urbaine de l'arrondissement Villeray–Saint Michel–Parc Extension*. PDF en ligne : Tandem VSP (Villeray–Saint Michel–Parc Extension). Récupéré le 8 et le 12 décembre 2015 de docplayer.fr/3924557-Diagnostic-local-de-securite-urbaine-de-l-arrondissement-tandem-Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension.html.
- Crompton, J. et Wicks, B. E. (1988). Implementing a preferred equity model for the delivery of leisure services in the US context. *Leisure Studies*, 7(3), 287-304. doi: 10.1080/02614368800390251.
- Crouse, D. L., Ross, N. A. et Goldberg, M. S. (2009, 1er septembre). Double burden of deprivation and high concentrations of ambient air pollution at the neighbourhood

scale in Montreal, Canada. *Social Science & Medicine*, 69(6), 971-981. doi: 10.1016/j.socscimed.2009.07.010.

Direction des grands parcs et du verdissement (DGPV), Division de l'arboriculture. (2011). *La Canopée montréalaise*. PDF en ligne : Ville de Montréal. Récupéré le 12 avril 2018 de www.ville.montreal.qc.ca.

Direction des grands parcs et du verdissement (DGPV) et Société de verdissement du Montréal métropolitain (SOVERDI). (2012, 25 mai). *Plan d'action canopée 2012 2021*. PDF en ligne : Ville de Montréal. Récupéré en janvier 2017 de www.ville.montreal.qc.ca.

Di Marino, M. et Lapintie, K. (2017). Exploring the concept of green infrastructure in urban landscape. Experiences from Italy, Canada and Finland. *Landscape Research*, 43(1), 139-149.

Dobbs, C., Nitschke, C. R. et Kendal, D. (2014). Global Drivers and Tradeoffs of Three Urban Vegetation Ecosystem Services. *PLOS ONE*, 9(11), e113000. doi: 10.1371/journal.pone.0113000.

Fletcher, R. L. (1996). The Occurrence of "Green Tides" — a Review. Dans W. Schramm et P. H. Nienhuis (dir.), *Marine Benthic Vegetation: Recent Changes and the Effects of Eutrophication* (chap. 2, p. 7-43). Berlin, Heidelberg : Springer.

Flocks, J., Escobedo, F., Wade, J., Varela, S. et Wald, C. (2011, 1er juin). Environmental Justice Implications of Urban Tree Cover in Miami-Dade County, Florida. *Environmental Justice*, 4(2), 125-134. doi: 10.1089/env.2010.0018.

Frank, L., Engelke, P. O. et Schmid, T. (2003). *Health and Community Design: the Impact of the Built Environment on Physical Activity*. Island Press.

Friends of the Urban Forest et City of San Francisco. (2017). *San Francisco Urban Forest Map*. Récupéré en 2018 de www.urbanforestmap.org.

Futura planète. (s. d.). *Lixiviati*. Récupéré le 11 juillet 2018 de www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-lixiviati-7319/.

Gies, P., van Deventer, E., Green, A. C., Sinclair, C. et Tinker, R. (2018). Review of the Global Solar UV Index 2015 Workshop Report. *Health Physics*, 114(1), 84-90. doi: 10.1097/hp.0000000000000742.

Gourévitch, B., Edeline, J.-M., Occelli, F. et Eggermont, J. J. (2014). Is the din really harmless? Long-term effects of non-traumatic noise on the adult auditory system. *Nature*

Reviews Neuroscience, (15), 483-491. Récupéré en octobre 2017 de www.nature.com/articles/nrn3744#supplementary-information.

Gravel, P. (2017, 7 octobre). Entrevue avec Xavier Lachapelle-Trouillard : Phytotechnologie : des saules pour épurer les eaux usées. Dans *Le Devoir*. Récupérée de www.ledevoir.com/societe/science/509862/phytotechnologie-des-saules-pour-epurer-les-eaux-usees.

Hampp, R. et Höll, W. (1974, 1er juin). Radial and axial gradients of lead concentration in bark and xylem of hardwoods. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2(2), 143-151. doi: 10.1007/BF01975468.

Hartig, T. (2008, novembre). Green space, psychological restoration, and health inequality. *The Lancet*, 372(9650), 1614-1615. doi: 10.1016/S0140-6736(08)61669-4.

Henning, J., (*i-Tree* Technical Services) (2017, 22 août). [Communication privée].

Hirabayashi, S. (2016, 14 avril 2016). *Air Pollutant Removals, Biogenic Emissions and Hydrologic Estimates for i Tree Applications. Version 1.1*. PDF en ligne. Récupéré le 14 avril 2016 de www.itreetools.org/landscape/resources/Air_Pollutant_Removals_Biogenic_Emissions_and_Hydrologic_Estimates_for_iTree_v6_Applications.pdf.

Hirabayashi, S., Kroll, C. N. et Nowak, D. J. (2015, 27 février). *i-Tree Eco Dry Deposition Model Description*. PDF en ligne. Récupéré en juin 2017 de www.itreetools.org/eco/resources/iTree_Eco_Dry_Deposition_Model_Descriptions.pdf.

INSPQ. (s. d. a). *Les Effets de la chaleur*. En ligne. Récupéré le 27 février 2018 de www.monclimatmasante.qc.ca/effets-de-la-chaleur.aspx.

INSPQ. (s. d. b). *Îlots de chaleur*. En ligne. Récupéré en septembre 2017 de www.monclimatmasante.qc.ca/ilots-de-chaleur.aspx.

INSPQ. (s. d. c). *Ressources et maladies hydriques*. En ligne. Récupéré le 27 février 2018 de www.monclimatmasante.qc.ca/maladies-hydriques.aspx.

i-Tree. (2017a). *i Tree Eco Field Guide*. PDF en ligne. Récupéré en 2017 de www.itreetools.org/resources/manuals/ECov6_ManualsGuides/ECov6_FieldManual.pdf.

i-Tree. (2017b). *i Tree Eco User's Manuel*. PDF en ligne. Récupéré en 2017 de www.itreetools.org/resources/manuals/ECov6_ManualsGuides/ECov6_UsersManual.pdf.

i-Tree. (s. d. a). *i Tree Eco Guide to Data Limitations [for i Tree Eco v6.0]*. PDF en ligne. Récupéré en août 2017 de

www.itreetools.org/resources/manuals/ECov6_ManualsGuides/ECov6Guide_DataLimitations.pdf.

i-Tree. (s. d. b). *i Tree Eco Guide to Using the Forecast Model*. PDF en ligne. Récupéré en 2018 de www.itreetools.org/resources/manuals/ECov6_ManualsGuides/ECov6Guide_UsingForecast.pdf.

Jasmani, Z., Peter Ravn, H. et Konijnendijk van den Bosch, C. (2017). The influence of small urban parks characteristics on bird diversity: A case study of Petaling Jaya, Malaysia. *Urban Ecosystems*, 20(1), 227-243. doi: 10.1007/s11252-016-0584-7.

Lachance (dir.), R. (2017). *Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020 : Les Constats. Édition 2017*. PDF en ligne : Ville de Montréal. Récupéré le 14 août 2018 de www.ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/enviro_fr/media/documents/paccam_2015-2020_lesconstats.pdf.

Lachapelle-Trouillard, X. (2017). *Critères de dimensionnement et d'opération d'un procédé de traitement des eaux usées municipales par plantation de saules à croissance rapide en climat québécois* (Mémoire de maîtrise en génie civil). Université de Montréal. PDF en ligne. Récupéré le 11 juillet 2018 de www.publications.polymtl.ca/2903/7/2017_XavierLachapelleTrouillard.pdf.

Levrel, H., Cabral, P., Feger, C., Chambolle, M. et Basque, D. (2017, 1er novembre). How to overcome the implementation gap in ecosystem services? A user-friendly and inclusive tool for improved urban management. *Land Use Policy*, 68, 574-584. doi: 10.1016/j.landusepol.2017.07.037.

Limoges, S. (2017). *L'arbre de rue montréalais : relations entre le diamètre à hauteur de poitrine et les conditions biophysiques, le cadre bâti et le statut socioéconomique de la population* (Mémoire de maîtrise en études urbaines). Université du Québec à Montréal et Institut national de la recherche scientifique — Urbanisation, Culture et Société. PDF en ligne. Récupéré en 2018 de www.archipel.uqam.ca/9807.

Livesley, S. J., McPherson, E. G. et Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119-124. doi: 10.2134/jeq2015.11.0567.

Locke, D. H., Grove, J. M., Lu, J. W. T., Troy, A., O'Neil-Dunne, J. P. M. et Beck, B. D. (2010). Prioritizing Preferable Locations for Increasing Urban Tree Canopy in New York City. *Cities and the Environment*, 3(1), 18 pages. doi: 10.15365/cate.3142010.

- Martínez Gaete, C. (2016, 28 novembre). New York City Mapped All of its Trees and Calculated the Economic Benefits of Every Single One. *ArchDaily: the world's most visited architecture website*.
- McPherson, E., Nowak, D., Heisler, G., Grimmond, C., Souch, C., Grant, R. et Rowntree, R. (1997). Quantifying urban forest structure, function, and value: The Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban Ecosystems*, 1(1), 49-61.
- Ministère de l'Environnement et du changement climatique du Canada (MECCC). (2013-2017). *Principaux contaminants atmosphériques* En ligne : Gouvernement du Canada. Récupéré en août 2017 de www.ec.gc.ca/Air.
- Ministère de l'Environnement et du changement climatique du Canada (MECCC). (2016, décembre). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Qualité de l'air*. N° de cat. : En4-144/57-2016F-PDF. ISBN : 978-0-660-06018-7. Récupéré de https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/main/indicateurs-indicators/307cce5b-077a-487f-95c4-17839faec701/airquality_fr.pdf ou de www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=7DCC2250-1.
- Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (s. d.). *Capsules d'information sur les services écologiques*. En ligne : Gouvernement du Québec. Récupéré en janvier 2017 de www.mddelcc.gouv.qc.ca/biodiversite/capsules.
- MEA. (2003). Les écosystèmes et le bien-être de l'Homme : Un cadre d'évaluation. Résumé, 28 pages. World Resources Institute. Récupéré en 2017 de www.millenniumassessment.org/documents/document.6.aspx.pdf.
- Meerow, S. et Newell, J. P. (2017). Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, (159), 62-75. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.10.005.
- Morani, A., Nowak, D., Hirabayashi, S. et Calfapietra, C. (2011). How to select the best tree planting locations to enhance air pollution removal in the MillionTreesNYC initiative. *Environmental Pollution*, 159(5), 1040-1047.
- Moreira, J. F. V. et Boudreault, M.-C. (2012, juin). *Ouvrages de surverse et stations d'épuration : Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2011*. BANQ : ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT), prédécesseur du ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire du Québec (MAMOT). Récupéré le 9 juillet 2018 de mamot.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/ministere/acces_information/Diffusion_i

nformation/2017-
122_rapport_ouvrage_municipaux_assainissement_eau_partie_3.pdf.

- Na, H. R., Heisler, G. M., Nowak, D. J. et Grant, R. H. (2014, 1er janvier). Modeling of urban trees' effects on reducing human exposure to UV radiation in Seoul, Korea. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 785-792. doi: 10.1016/j.ufug.2014.05.009.
- Nowak, D. J. (1996). Estimating Leaf Area and Leaf Biomass of Open-Grown Deciduous Urban Trees. *Forest Science*, 42(4), 504-507. doi: 10.1093/forestscience/42.4.504.
- Nowak, D. J. (2008). *I-Tree Species Methods*. PDF en ligne. Récupéré en février 2018 de itreetools.org/species/resources/SpeciesSelectorMethod.pdf.
- Nowak, D. J. et Crane, D. E. (2002, 1er mars). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116(3), 381-389. doi: 10.1016/S0269-7491(01)00214-7.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A. et Greenfield, E. (2014, octobre). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, 119-129. doi: 10.1016/j.envpol.2014.05.028.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A. et Hoehn, R. (2013). Modeled PM2.5 removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 178, 395-402. doi: 10.1016/j.envpol.2013.03.050.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M. et Pasher, J. (2018, 1er janvier). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 40-48. doi: 10.1016/j.ufug.2017.10.019.
- OECD. (2008). Part I. Constructing a Composite Indicator, Part 2. A Toolbox for Constructors. Dans *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and UserGuide*. PDF en ligne. Récupéré en novembre 2018 de oecd.org/sdd/42495745.pdf.
- OMS. (2010, avril). Urbanisation et santé. *Bulletin de l'Organisation mondiale de la santé*, (88), p. 241-320.
- OMS. (s. d.). *Pollution atmosphérique*. Dans *Santé publique, environnement et déterminants sociaux de la santé : Thèmes de santé*. Récupéré en octobre 2017 de www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/fr.
- Orlandini, S., Vanos, J., Matzarakis, A., Massetti, L. et Petralli, M. (2017). Urban Forestry and Microclimate. Dans F. Ferrini, C. C. Konijnendijk van den Bosch et A. Fini (dir.), *Routledge Handbook of Urban Forestry* (Routledge éd., chap. 7, p. 96-111). New York : Routledge.

- Padoa-Schioppa, E. et Canedoli, C. (2017). Urban Forests and Biodiversity. Dans F. Ferrini, C. C. Konijnendijk van den Bosch et A. Fini (dir.), *Routledge Handbook of Urban Forestry* (Routledge éd., chap. 9, p. 123-135). New York : Routledge.
- Pham, T.-T.-H., Apparicio, P., Landry, S. et Lewnard, J. (2017, 1er janvier). Disentangling the effects of urban form and socio-demographic context on street tree cover: A multi-level analysis from Montréal. *Landscape and Urban Planning*, 157, 422-433. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.09.001.
- Pham, T.-T.-H., Apparicio, P., Landry, S., Séguin, A.-M. et Gagnon, M. (2013, 1er janvier). Predictors of the distribution of street and backyard vegetation in Montreal, Canada. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(1), 18-27. doi: 10.1016/j.ufug.2012.09.002.
- Pham, T.-T.-H., Apparicio, P., Séguin, A.-M. et Gagnon, M. (2011). Mapping the Greenscape and Environmental Equity in Montreal: An Application of Remote Sensing and GIS. Dans S. Caquard, L. Vaughan et W. Cartwright (dir.), *Mapping Environmental Issues in the City: Arts and Cartography Cross Perspectives* (chap. 3, p. 30-48). Berlin, Heidelberg : Springer.
- Pham, T.-T.-H., Apparicio, P., Séguin, A.-M., Landry, S. et Gagnon, M. (2012). Spatial distribution of vegetation in Montreal: An uneven distribution or environmental inequity? *Landscape and Urban Planning*, 107(3), 214–224.
- Pickett, S. T. A., Belt, K., Galvin, M., Groffman, P., Grove, M., Outen, D. C., Pouyat, R., Stack, W. P. et Cadenasso, M. (2007, juin). Watersheds in Baltimore, Maryland: Understanding and Application of Integrated Ecological and Social Processes. *Journal of Contemporary Watershed Research and Education*, (136), 44-55. doi: 10.1111/j.1936-704X.2007.mp136001006.x.
- Pilat, M. J. (2009). *Atmospheric Air Pollutant Dispersion*. PDF en ligne du cours ENVH461–Air Pollution Control donné à la session d’automne 2009 à l’Université de Washington. Récupéré en 2017 de www.courses.washington.edu/cee490/PlumeD4.pdf.
- Pilon, R. (2015a). *Aperçu de l’apport architectural et urbanistique de la pluralité ethnique de Montréal* [Document non publié. Travail de session du cours EUT3060–Démographie ethnoculturelle en milieu urbain donné à la session d’été 2015 à l’Université du Québec à Montréal (UQÀM)]. Récupéré en avril 2019 de www.publications-signees-rachel-pilon.webnode.fr/aperçu-de-l'apport-architectural-et-urbanistique-de-la-pluralite-ethnique-de-montreal/.
- Pilon, R. (2015b). *Définition du concept de santé publique*. Sécurité et santé dans le quartier Parc-Extension. [Document non publié. Travail de session du cours EUT1051–Dimensions sociales de la ville donné à la session d’automne 2015 à l’Université du

Québec à Montréal (UQÀM)]. Récupéré en avril 2019 de www.publications-signees-rachel-pilon.webnode.fr/securite-et-sante-dans-le-quartier-parc-extension-definition-des-concepts-de-securite-et-de-sante-publique/.

Pincetl, S. (2003). Nonprofits and Park Provision in Los Angeles: An Exploration of the Rise of Governance Approaches to the Provision of Local Services*. *Social Science Quarterly*, 84(4), 979-1001. doi: 10.1046/j.0038-4941.2003.08404019.x.

Preston, S. M. P. et Raudsepp-Hearne, C., (auteures principales). (2017). *Réalisation et utilisation d'une évaluation des services écosystémiques aux fins de prises de décisions : boîte à outils interdisciplinaire à l'intention des gestionnaires et des analystes*. Ottawa : gouvernements fédéraux, provinciaux et territoriaux du Canada, Groupe de travail sur l'étude sur l'importance de la nature pour les Canadiens Récupéré en mars 2017 de www.publications.gc.ca/collections/collection_2017/eccc/En4_295_2016_fra.pdf.

Pui, D. Y. H., Chen, S.-C. et Zuo, Z. (2014). PM2.5 in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation. *Particuology*, 13, 1-26. doi: 10.1016/j.partic.2013.11.001.

Quenneville, S. (2017, 20 avril). *Accès aux espaces verts locaux* [Conférence]. Montréal : Le Bulletin Vert.

Ressources naturelles Canada. (2016). *Agrile du frêne* En ligne Récupéré en septembre 2017 de www.rncan.gc.ca/forets/feux_insectes_perturbations/principaux_insectes/13378 et de www.rncan.gc.ca/forets/feux_insectes_perturbations/principaux_insectes/13396.

Roach, J. (2006, 17 janvier). Entrevue avec Dale Quattrochi : Cities Make Own Weather Due to Trapped Heat, Expert Says. Dans *National Geographic News*. Récupérée de https://news.nationalgeographic.com/news/2006/01/0117_060117_heat_island.html.

Sæbø, A., Janhäll, S., Gawronski, S. W. et Hanslin, H. M. (2017). Urban Forestry and Pollution Mitigation. Dans F. Ferrini, C. C. Konijnendijk van den Bosch et A. Fini (dir.), *Routledge Handbook of Urban Forestry* (Routledge éd., chap. 8, p. 112-122). New York : Routledge.

Schwarz, K., Fragkias, M., Boone, C. G., Zhou, W., McHale, M., Grove, J. M., O'Neil-Dunne, J., McFadden, J. P., Buckley, G. L., Childers, D., Ogden, L., Pincetl, S., Pataki, D., Whitmer, A., Cadenasso, M. L. (2015). Trees grow on money: urban tree canopy cover and environmental justice. *PloS one*, 10(4), e0122051-e0122051. doi: 10.1371/journal.pone.0122051.

- Serpantié, G., Méral, P. et Bidaud, C. (2012). Des bienfaits de la nature aux services écosystémiques : Éléments pour l'histoire et l'interprétation d'une idée écologique. *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12(3).
- Smetacek, V. et Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504(7478), 84-88. doi: 10.1038/nature12860.
- SOVERDI. (s. d.). *Accueil et Inscription*. Dans *SOVERDI*. Récupéré le 9 juillet 2018 de www.soverdi.org.
- SQP. (2017). *Définition; Les Phytotechnologies : Arbres de rue; Les Phytotechnologies : Phytoremédiation*. Dans *Société québécoise de phytotechnologies*. Récupéré le 11 avril 2018 de www.phytotechno.com/definitions; www.phytotechno.com/phytotechnologies.
- Statistique Canada. (2017a). *Dictionnaire, Recensement de la population, 2016*. Dans *Statistique Canada*. Récupéré en 2017 et en 2018 de www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/ref/dict/index-fra.cfm.
- Statistique Canada. (2017b, 29 novembre). Montréal, V [Subdivision de recensement], Québec et Québec [Province] (tableau). *Profil du recensement, Recensement de 2016*. [Base de données]. Produit n° 98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Récupéré de www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm.
- Ulrich, R. S. (1981, 1er septembre). Natural Versus Urban Scenes: Some Psychophysiological Effects. *Environment and Behavior*, 13(5), 523-556. doi: 10.1177/0013916581135001.
- Université de la Caroline du Sud, Hazards and Vulnerability Research Institute. (2013). *SoVI: Social Vulnerability Index for the United States - 2010-2014*. Récupéré en 2018 et en 2019 de www.artsandsciences.sc.edu/geog/hvri/sovi%C2%AE-0.
- USFS. (2005-2016). *i-Tree Eco v6* (version v6). En ligne. Récupéré en décembre 2016 de itreetools.org.
- Ville de Montréal, Bureau Accès Montréal de l'arrondissement Le Plateau-Mont-Royal (1er novembre 2018). [Communication privée].
- Ville de Montréal, Comité de suivi du projet d'optimisation du réseau d'eau potable. (2011, septembre). *Stratégie montréalaise de l'eau 2011 2020 ou Enjeux, orientations et objectifs pour une nouvelle stratégie de l'eau. Compteurs ici (industries, commerces et institutions) et optimisation des réseaux*. [Rapport]. PDF en ligne. Récupéré le 1^{er} mars 2018 de

www.ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/eau_fr/media/documents/rapport-version-integrale.pdf.

Ville de Montréal. (2013-2017). [Base de données]. En ligne : Portail données ouvertes. Récupéré en mai 2018 de <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset>.

Ville de Montréal, Service des grands parcs, du verdissement et du Mont-Royal. (2016). *Arbres de rue et hors rue ou Répertoire des données sur les arbres publics du territoire de la Ville de Montréal*. [Base de données]. Montréal. Récupéré en janvier 2017 (version de décembre 2016) de http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/arbres/ressource/1a665996_a216_4f97_aa1c_9b0a3e21fb10?inner_span=True.

Ville de Montréal. (2016). Base de données]. En ligne : Portail données ouvertes. Récupéré en mai 2018 de <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/ouvrage-surverse>.

Ville de Montréal. (s. d. a). *Coût du traitement par mètre cube d'eaux usées (incluant l'amortissement)*. Dans *Vue sur les indicateurs de performance : Gestion de l'eau*. Récupéré le 14 août 2018 de www.ville.montreal.qc.ca/vuesurlesindicateurs/index.php?kpi=2598.

Walker, G. (2012). *Environmental Justice: Concepts, Evidence and Politics*. Londres : Routledge. doi: 10.4324/9780203610671.

Wang, X., Yao, J., Yu, S., Miao, C., Chen, W. et He, X. (2018). Street Trees in a Chinese Forest City: Structure, Benefits and Costs. *Sustainability*, 10(3), 674. doi:10.3390/su10030674.

Weber, G. et Phillips, H., (East Lab). (2004). Air Quality Model: Central Campus Air Quality Model (CCAQM) Instructions. Mixing Height and Inversions. Récupéré en juin 2017 de www-personal.umich.edu/~weberg/mixing_height_inv.htm.

Zhao, M., Escobedo, F. et Staudhammer, C. L. (2010). Spatial patterns of a subtropical, coastal urban forest: Implications for land tenure, hurricanes, and invasives. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9(3), 205-214.

Zhou, W., Huang, G., Pickett, S. T. A. et Cadenasso, M. L. (2011, 15 mars). 90 years of forest cover change in an urbanizing watershed: spatial and temporal dynamics. *Landscape Ecology*, 26(5), 645. doi: 10.1007/s10980-011-9589-z.