



LA VALEUR ÉCONOMIQUE DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES RENDUS PAR LES ARBRES MUNICIPAUX DE LA VILLE DE QUÉBEC

Rapport final
Décembre 2018



LA VALEUR ÉCONOMIQUE DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES RENDUS PAR LES ARBRES MUNICIPAUX DE LA VILLE DE QUÉBEC

Rapport final
Décembre 2018

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Sylvia Wood, stagiaire postdoctorale à l'Institut des Sciences de la Forêt Tempérée (ISFORT), Université du Québec en Outaouais

Jérôme Dupras, Professeur agrégé, Département des sciences naturelles Université du Québec en Outaouais et chercheur à l'Institut des Sciences de la Forêt Tempérée (ISFORT)

Sylvain Delagrange, Professeur titulaire, département des sciences naturelles Université du Québec en Outaouais et chercheur à l'Institut des Sciences de la Forêt Tempérée (ISFORT)

Anne Voyer, Assistante de recherche, Université Laval

Nancy Gélinas, Professeure titulaire, département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval

Laurent Da Silva, Économiste principal, Ouranos

RÉVISION LINGUISTIQUE :

Marie-Anta Diop, Ouranos

Titre du projet Ouranos: Analyses économiques en support à la mise en œuvre de mesures environnementales et au déploiement du Plan d'adaptation aux changements climatiques – Volet Canopée Urbaine

Citation suggérée : Wood, S.L.R., Dupras, J., Delagrange, S., Voyer, A., Gélinas, N., Da Silva, L. (2018), *La valeur économique des services écosystémiques rendus par les arbres municipaux de la Ville de Québec* Ouranos. 40 p. + annexes.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont la responsabilité des auteurs. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été rendu possible grâce à la collaboration de la Division de la foresterie urbaine et de l'horticulture de la Ville de Québec, le Consortium de recherche sur les changements climatiques Ouranos et le programme Mitacs Accélération.

Les auteurs tiennent à remercier plus particulièrement les différents collaborateurs de la ville de Québec ayant partagé leurs informations et leurs connaissances au profit de cette étude. En particulier :

Jérôme Picard, conseiller en environnement à la Division de la foresterie urbaine et de l'horticulture de la Ville de Québec

Christian Bélanger, conseiller en environnement à la Division de la foresterie urbaine et de l'horticulture de la Ville de Québec

Marie-Josée Coupal, conseillère en environnement à la Division du développement durable de la Ville de Québec

Ghislain Breton, conseiller en environnement à la Division du développement durable de la Ville de Québec

Dominic Aubé, conseiller en environnement à la Division du développement durable de la Ville de Québec.

Les auteurs tiennent également à remercier les **stagiaires en technologie forestière ou au baccalauréat en aménagement et environnement forestier** de la Ville de Québec qui ont participé à la collecte des données de terrain.



RÉSUMÉ

Cette étude et ce rapport ont été préparés, à la demande de la Ville de Québec, par le consortium Ouranos en collaboration avec des chercheurs de l'Université du Québec en Outaouais et de l'Université Laval. Le projet vise à estimer la valeur économique des services écosystémiques des arbres municipaux sur le territoire de la Ville de Québec. Cette démarche poursuit la sensibilisation des différentes parties prenantes aux avantages des arbres pour les habitants de la ville et la production d'une information nouvelle pour la planification et la gestion de la forêt urbaine.

Pour réaliser cette analyse, l'équipe de projet a utilisé le logiciel i-Tree Eco v6 (2018) développé par le U.S.D.A. Forest Service. Le logiciel i-Tree Eco estime les services écosystémiques d'un arbre en fonction de l'espèce, de son emplacement et de la structure de son couvert forestier. Le modèle fournit notamment des estimations de la valeur structurelle des arbres (stockage total actuel de carbone dans les troncs et les valeurs culturelles quantifiées par la méthode du coût de remplacement), ainsi que des valeurs fonctionnelles de séquestration du carbone, de filtration de la pollution atmosphérique, de ruissellement évité des eaux de pluie et d'économie d'énergie pour le chauffage et la climatisation des bâtiments résidentiels.

Afin de collecter les données manquantes à l'inventaire municipal du couvert forestier de la Ville de Québec (103 020 arbres sont référencés par la Ville) et d'améliorer la prévision du modèle, l'équipe de projet a réalisé une campagne d'échantillonnage terrain (données récoltées sur 2 352 arbres). Les échantillons ont été stratifiés en fonction des espèces et des diamètres de tronc afin de créer des relations allométriques spécifiques à chaque espèce, basées sur le diamètre hauteur de poitrine (DHP) pour les variables manquantes.

Nous estimons que les arbres municipaux constituent environ 6,7% de la couverture forestière dans le périmètre urbain ou à peu près 5km² des 75km². Nos résultats montrent que ces arbres des rues et parcs publics urbains de la Ville de Québec séquestrent 650,5 tonnes supplémentaires de carbone chaque année dans leurs troncs, leurs racines et leur canopée. Avec une surface de feuilles totalisant 23 km², la canopée des arbres publics produit chaque année 1 734 tonnes d'oxygène et élimine 16,1 tonnes de polluants atmosphériques nocifs, améliorant ainsi la qualité de l'air en ville. Les arbres réduisent également le ruissellement d'eaux pluviales d'environ 62 930 m³/an. L'ombrage des arbres publics contribue à la climatisation naturelle de l'environnement bâti en milieu urbain, réduit les coûts de chauffage et de climatisation de 343 391 \$ par an et évite l'émission de 547 tonnes de carbone dans l'atmosphère des sources d'énergies thermiques. Outre ces services annuels, les arbres urbains fournissent aussi des services structurels qui s'expriment sur une plus longue période. En effet, ils stockent 23 595 tonnes de carbone dans leur biomasse et ont une valeur esthétique qui s'élève à 216 M\$. Dans une perspective de gestion de la forêt urbaine, nous reportons ces deux valeurs sur la durée d'une vie moyenne de 32 ans pour un arbre urbain dans la Ville de Québec pour obtenir une valeur économique annuelle. Ainsi, chaque année, les arbres municipaux sur le territoire de la Ville de Québec fournissent des services écosystémiques fonctionnelles d'une valeur de 629 818 \$/an et de 6,9 M\$/an en services structurels pour une valeur totale de 7,5 M\$ par année en bénéfices écologiques.

TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction	1
2.	Contexte et objectifs	3
2.1	Objectifs.....	3
2.2	Survol de la canopée de la Ville de Québec.....	3
2.2.1	La forêt urbaine.....	3
2.2.2	Les arbres urbains gérés par la Ville de Québec.....	5
3.	Méthodologie.....	9
3.1	Inventaire des arbres municipaux et échantillonnage sur le terrain	Erreur! Signet non défini.
3.2	Estimation des mesures manquantes.....	Erreur! Signet non défini.
3.3	Le calcul des services écosystémiques	9
3.3.1	Services fonctionnels.....	9
3.3.2	Services structurels	11
4.	Résultats et discussion	14
4.1	La valeur des services écosystémiques fonctionnels.....	14
4.1.1	L'atténuation des changements climatiques	14
4.1.2	La contribution des arbres municipaux à la régulation de la température.....	15
4.1.3	Le ruissellement évité des eaux de pluie	18
4.1.4	L'amélioration de la qualité de l'air.....	19
4.2	La valeur des services écosystémiques structurels	22
4.2.1	Le stockage du carbone.....	22
4.2.2	La valeur culturelle	24
5.	Conclusion.....	25
5.1	La valeur économique totale des arbres municipaux.....	25
5.2	La valeur de la canopée urbaine.....	26
	Références	29
	Annexe I – Méthode d'extrapolation des caractéristiques allométriques.....	34
	Annexe II – Mesures de dérivation pour le modèle d'énergie.....	37
	Annexe III – Dérivation de la valeur totale d'un arbre	38
	Annexe IV – Calcul de la valeur totale de la canopée urbaine	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Répartition de la couverture forestière dans la Ville de Québec 4

Figure 2 – Répartition des arbres municipaux dans (A) le périmètre urbain de la ville de Québec; (B) Nombre d’arbres municipaux par quartier et (C) Densité d’arbres municipaux par quartier dans la Ville de Québec. 6

Figure 3 – La distribution des espèces des arbres municipaux de la Ville de Québec 8

Figure 4 – Exemple des relations allométriques établies entre les mesures de diamètre à hauteur de poitrine et la largeur de la couronne (A, C) et la hauteur totale de l’arbre (B, D) à l’aide des méthodes linéaires (A), semi-log (B), quadratique (C) ou log-log (D) **Erreur! Signet non défini.**

Figure 5 – Séquestration totale de carbone par les arbres municipaux par classe de diamètre 14

Figure 6 – Répartition du taux de séquestration de carbone par les arbres urbains dans la Ville de Québec 15

Figure 7 – Répartition temporelle de l’évapotranspiration et la température au cours de l’année (A) et Répartition spatiale de l’évapotranspiration d’eau par les arbres municipaux (B) dans la Ville de Québec 17

Figure 8 – Cartographie des îlots de chaleur urbains sur le territoire de la ville de Québec et répartition de la couverture forestière. 18

Figure 9 – Cartographie du ruissellement évité par les arbres urbains dans la Ville de Québec 19

Figure 10 – Kilogrammes et valeur économique des polluants aériens retirés de l’air par les arbres municipaux (A) et l’amélioration de la qualité de l’air par les arbres municipaux de la Ville de Québec 20

Figure 11 – Répartition du service d’amélioration de la qualité de l’air, en kilogrammes de polluants retirés par année. 21

Figure 12 – Répartition du stockage de carbone dans les arbres municipaux dans la Ville de Québec (A) et les dix espèces d’arbres les plus importants en termes de stockage de carbone (B) 23

Figure 13 – La répartition approximative de la valeur des services écosystémiques rendu au cours de la vie d’un érable de Norvège, *Acer platanoides* (A) et frêne rouge, *Fraxinus pennsylvanica* (B) 26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Couvert forestier dans certaines villes canadiennes 3

Tableau 2 – Couvert forestier dans les arrondissements de la Ville de Québec 5

Tableau 3 – Nombre et aire des arbres municipaux dans les quartiers et arrondissements de la Ville de Québec et le couvert forestier (CF) dans la périmètre urbain (PU) 7

Tableau 4 – Abondance et surface foliaire des espèces dominantes 8

Tableau 5 – Valeurs économiques fournies et appliquées à la production des services écosystémiques de i-Tree..... 13

Tableau 6 – Variation des besoins en énergie provenant de la présence des arbres municipaux..... 16

Tableau 7 – Les valeurs fonctionnelles et structurelles totales pour les services écosystémiques des arbres municipaux de la Ville Québec..... 25

Tableau 8 – Les valeurs fonctionnelles et structurelles totales pour les services écosystémiques de la canopée urbain de la Ville de Québec..... 28

GLOSSAIRE

Arbres municipaux : Les arbres de rue et dans les parcs publics qui ont été plantés et qui sont gérés par la Ville de Québec.

Arbres privés : Les arbres qui se trouvent sur les propriétés privées dont la responsabilité incombe à des citoyens ou des entreprises.

Arbre urbain ou forêt urbaine : Tout arbre ou boisé qui pousse à l'intérieur des limites de la Ville de Québec.

Couvert forestier (CF) : Pourcentage de la surface occupée par la couverture de la cime des arbres et de la surface totale du territoire. Plus l'indice est élevé, plus le territoire est couvert d'arbres.

Couronne forestière : Canopée qui se trouve hors du périmètre urbain de la ville, mais dans les limites territoriales de la ville de Québec.

Canopée urbaine : L'ensemble des branches et feuilles des cimes des arbres urbains

Services écosystémiques (SE): Biens et services fournis par les écosystèmes (naturels et semi-naturels) et dont bénéficient tous les êtres humains. Ces services incluent les services d'approvisionnement (nourriture, eau, combustible, fibres, etc.), les services de régulation (climat, érosion, maladies, etc.), les services culturels (bénéfices sur les plans récréatifs, esthétiques et spirituels) et les services de support (formation des sols, production primaire, air respirable, etc.).

SE fonctionnel : Service écosystémique produit à travers un fonctionnement écologique qui apporte un/des bénéfice(s) pour les êtres humains. Ces services incluent les services de filtration de l'air et de l'eau, de séquestration de carbone, de réduction de la température aérienne, de réduction des eaux de ruissellement, etc.

SE structurel : Service écosystémique produit à travers la présence et forme physique d'un écosystème ou élément naturel (ex. arbre). Ces biens et services incluent les services esthétiques, spirituels, patrimoniaux, sociaux, de stockage de carbone, etc.

Flux de SE : Production et transmission d'un bien ou service écosystémique fonctionnel aux êtres humains, au cours d'une période temporelle donnée (généralement une année).

Stock de SE : Accumulation d'un bien ou service écosystémique à même un écosystème ou un arbre. Par exemple : stockage de carbone, eau dans un réservoir hydroélectrique.

Périmètre urbain : Délimitation administrative des zones d'urbanisation dans la Ville de Québec.

1. INTRODUCTION

Les arbres représentent un atout précieux pour les villes et apportent une contribution indéniable à la qualité de vie à court et long terme des citoyens. Les arbres constituent souvent l'élément dominant de l'infrastructure verte d'une ville, dans les parcs et le long des rues, créant ainsi un couvert forestier urbain. Au-delà de leur valeur esthétique, les arbres urbains offrent de nombreux avantages, ou de services, aux résidents. La littérature scientifique montre que les arbres améliorent non seulement l'esthétique des villes et la valeur des propriétés, mais peuvent également assurer des fonctions écologiques importantes et contribuer de manière significative à réduire les coûts économiques des municipalités (Dupras et al. 2015). Alors que de nouvelles recherches continuent de révéler les nombreuses façons dont les arbres améliorent l'environnement et la qualité de vie en ville, les urbanistes et les aménagistes incorporent de plus en plus la prise en compte de la forêt et des services qu'elle fournit dans l'aménagement du territoire (Bissonnette et al. 2018). Les prochains paragraphes offrent un survol des bénéfices associés aux arbres urbains.

Les arbres urbains sont « les poumons » des villes. Les villes, comparativement aux zones rurales, sont souvent soumises à une mauvaise qualité de l'air en raison d'activités industrielles et d'une forte concentration de véhicules à combustibles fossiles. Les arbres urbains peuvent jouer un rôle important dans l'amélioration de la qualité de l'air. Pendant la journée, les arbres absorbent le dioxyde de carbone (CO₂) par la photosynthèse, réduisant ainsi la concentration de ce gaz à effet de serre. De plus, leurs grandes surfaces foliaires agissent comme de vastes filtres éliminant les polluants nocifs tels que l'ozone, le monoxyde de carbone et les particules en suspension dans l'air (Freer-Smith et al. 1997, Nowak et al. 2006), contribuant ainsi à réduire le smog et les effets nocifs connexes sur la santé humaine.

La canopée comme « parapluie » naturel. En été, les arbres fournissent de l'ombre et bloquent les rayons UV nocifs (Heisler et Grant 2000), tout en refroidissant les températures de surface et de l'air (Streiling et Matzarakis 2003). Leurs cimes interceptent également la pluie lors des tempêtes, la canalisant sur des surfaces perméables pour être absorbée ou retournée dans l'atmosphère par évapotranspiration, réduisant ainsi le ruissellement des eaux pluviales (Armson et al. 2013) et refroidissant les températures de l'air local (Kurn et al. 1994). La canopée peut également bloquer les vents et créer de l'ombre, contribuant ainsi à réduire la demande énergétique des bâtiments résidentiels (Akbari et al. 2001, Donovan et Butry 2013).

Les arbres favorisent le sentiment de bien-être des citoyens. En plus de ces fonctions écologiques, de nouvelles recherches montrent que les arbres ont également des avantages positifs directs et indirects sur des dimensions moins tangibles du bien-être humain (Lee et Maheswaran 2011). Il a été démontré que les promenades dans les parcs et les zones boisées réduisent le stress (Jiang et al. 2014) et les effets de la dépression (Bratman et al. 2015), contribuant à une meilleure santé mentale. L'accès aux espaces boisés et aux parcs peut promouvoir l'exercice physique et ses bienfaits pour la santé (Morris 2003). Les espaces verts fournissent également des espaces culturellement importants pour les activités et interactions sociales (Coley et al. 1997, Maas et al. 2009), réduisant ainsi le sentiment d'isolement et favorisant la cohésion sociale (Grove et al. 2005).

Les arbres fournissent une panoplie de services écosystémiques. Outre les bénéfices cités ci-haut, les arbres urbains fournissent de nombreux autres services ; pensons à la séquestration du CO₂ ou à la fourniture d'habitats pour plusieurs espèces contribuant à maintenir une riche biodiversité. Ensemble, ce large éventail d'avantages tirés des arbres, et plus généralement de la nature, est appelé services écosystémiques. Les services écosystémiques sont les bénéfices que la nature fournit aux populations (Millenium Ecosystems Assessment 2005). La plupart de ces services découlent des fonctions écologiques de l'arbre qui offrent des avantages aux résidents ou aux collectivités en améliorant la qualité de l'environnement ou en réduisant les coûts d'infrastructure et d'exploitation. En conséquence, les arbres et autres espaces naturels fournissant de tels services sont parfois qualifiés « d'infrastructures vertes » dans la ville (Ahern 2007), par opposition à des « infrastructures grises » conçues par l'être humain pour fournir des services similaires ou complémentaires, par exemple un système de drainage des eaux pluviales. De nombreux services écosystémiques peuvent être quantifiés à la fois en termes biophysiques (à l'aide de mesures et de modèles sur le terrain) et économiquement grâce à diverses méthodes d'évaluation. Par exemple, les effets d'ombrage des arbres sur le chauffage et la climatisation des ménages peuvent être quantifiés à la fois en termes de réduction des coûts de climatisation et de quantité de carbone évité pour la production d'énergie thermique (Akbari et al. 2001).

D'autres avantages des arbres découlent de leur présence directe dans le paysage urbain et de l'interaction humaine avec l'arbre lui-même en raison de leurs impacts sur notre santé et notre bien-être. Ces avantages moins tangibles, ou ce que nous appelons des services écosystémiques structurels et culturels, sont beaucoup plus difficiles à quantifier, bien que de nouvelles méthodes d'évaluation économique tentent de relever ce défi.

La quantification des services écosystémiques. À l'échelle mondiale, l'évaluation économique des services écosystémiques est devenue une approche largement adoptée qui permet aux décideurs et aux planificateurs de mieux intégrer les arbres et les écosystèmes dans les décisions relatives à l'aménagement du territoire. Dans ce rapport, nous évaluons les services écosystémiques fournis par les arbres urbains gérés par la Ville de Québec, c'est-à-dire présents sur le domaine public. Ces arbres représentent à peu près 6,7 % du couvert forestier du périmètre urbain de la ville.

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

2.1 OBJECTIFS

Ce projet a pour objectif de quantifier et de monétiser la valeur des services écosystémiques fournis par les arbres publics de la Ville de Québec. Cette étude s'appuie sur la base de données des arbres publics urbains créée par la Ville de Québec. L'inventaire des arbres publics est une base de données géoréférencée de tous les arbres de rue et arbres des parcs de la Ville de Québec. Au moment de produire cette étude, l'inventaire comptait 103 267 arbres urbains plantés et vivants. Cette base de données n'inclut pas les arbres dans les forêts publiques ou les zones densément boisées des parcs; elle n'inclut pas non plus les arbres privés entretenus par des particuliers ou des entreprises.

2.2 SURVOL DE LA CANOPÉE DE LA VILLE DE QUÉBEC

2.2.1 LA FORÊT URBAINE

En comparaison avec les autres grands centres urbains du Canada, la Ville de Québec possède un couvert forestier urbain important en termes de superficies couvertes (tableau 1). Environ 32 % de la superficie du périmètre urbain présente un couvert forestier, jusqu'à 54 % si l'on inclut la couronne forestière au nord de la ville (Ville de Québec 2016) (Figure 1). Le couvert forestier fait référence au pourcentage de la surface occupée par la couverture de la cime des arbres et de la surface totale du territoire. En général, plus la couverture de la canopée est élevée, plus la présence en arbres est grande (Ville de Québec 2016). Dans la grande région de Québec, 243 km² des 453 km² sont couverts d'arbres.

Tableau 1 – Couvert forestier dans certaines villes canadiennes

VILLE	COUVERT FORESTIER
HALIFAX	41 % ^a
QUÉBEC	32 % ^b
MONTRÉAL	19 % ^c
TORONTO	27 % ^d
OAKVILLE	29 % ^e
EDMONTON	10 % ^f
VANCOUVER	43 % ^b

Sources : ^aFoster et Duinker 2017; ^bVille de Québec 2016; ^cAlexandre and DePrato 2014; ^dNowak et al. 2008, 2012; ^eMcNeil and Vava. 2006; ^fCity of Edmonton 2012

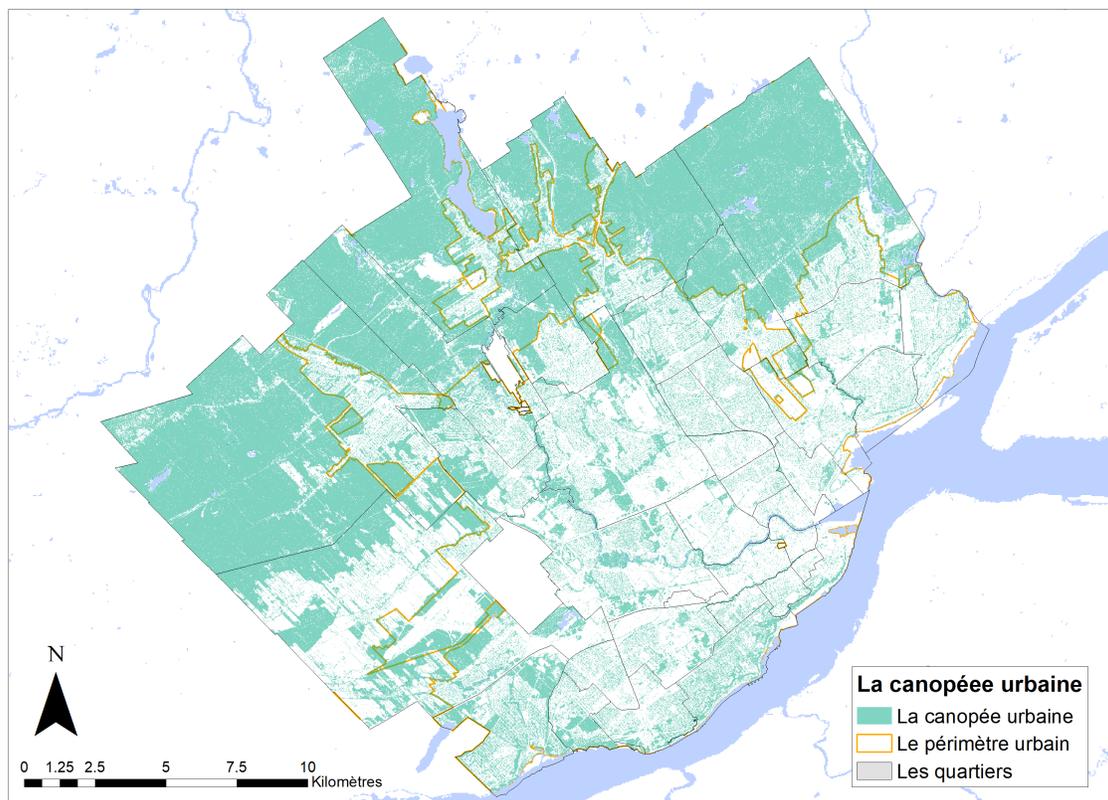


Figure 1 – Répartition de la couverture forestière dans la Ville de Québec

La couverture forestière est cependant très inégale sur le territoire. Le quartier du Vieux-Limoilou a une faible couverture forestière (10-25 %) alors que les quartiers de Charlesbourg, La Haute-Saint-Charles, et Saint-Foy-Sillery-Cap-Rouge ont un couvert forestier beaucoup plus élevé (34-43 %).

Dans un contexte d'urbanisation croissante, la Ville de Québec a adopté la vision de l'arbre 2015-2025 qui vise à accroître le couvert forestier de 32 % à 35 % d'ici 10 ans (Ville de Québec 2016). Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire d'assurer la conservation du couvert forestier actuel tout en augmentant stratégiquement le nombre de nouveaux arbres en considérant les spécificités du territoire de Québec. En effet, dans les quartiers les plus anciens et les plus densément construits, il sera essentiel d'accroître le nombre d'arbres de rue et d'arbres dans les parcs. En même temps, la réfection des infrastructures souterraines dans les quartiers plus anciens posera également des enjeux logistiques afin d'éviter l'abattage des arbres présents dans les emprises publiques. Finalement, dans les autres quartiers, le vieillissement de la forêt urbaine ainsi que les peuplements équiens âgés, forceront les aménagistes à prévoir le rajeunissement de la forêt avant qu'ils soient tous à remplacer.

Un autre défi pour atteindre cet objectif est l'arrivée récente de l'agrile du frêne, un insecte exotique envahissant qui ravage généralement tous les frênes d'un territoire. Ce ravageur provoque une mortalité élevée chez tous les arbres infectés et a déjà décimé les populations de frênes dans plusieurs régions de l'Amérique du Nord. Détecté pour la première fois en 2002 à Détroit, l'agrile du frêne avait déjà tué plus de 100 millions d'arbres en 2010 (Donovan et al.

2013), laissant de grandes trouées dans les canopées forestières urbaines et rurales. L'agrile du frêne a été détecté pour la première fois à Québec en 2017. La Ville de Québec a déjà mis en place une stratégie pour faire face à ce nouveau défi (Ville de Québec 2018). En s'efforçant de suivre l'épidémie, d'enlever les arbres touchés et de protéger les arbres à valeur de conservation élevée, la ville s'efforce de ralentir la propagation de ce ravageur. Cependant, la perte d'une partie importante des frênes et du couvert forestier urbain demeure une menace pour l'approvisionnement de services écosystémiques dans les décennies à venir. Cette nouvelle menace à la canopée urbaine de la Ville de Québec s'ajoute aux ravageurs déjà présents sur le territoire (dont la maladie hollandaise de l'orme), ainsi qu'à d'autres qui ne sont pas encore arrivés sur le territoire, dont le longicorne asiatique.

Tableau 2 – Couvert forestier dans les arrondissements de la Ville de Québec

ARRONDISSEMENT	COUVERT FORESTIER DANS LE PU	COUVERT FORESTIER INCLUANT LA « COURONNE FORESTIÈRE »**
BEAUPORT	26 %	55 %
CHARLESBOURG	34 %	59 %
LA CITE-LIMOILOU	17 %	17 %
LA HAUTE SAINT CHARLES	43 %	74 %
LES RIVIERES	27 %	27 %
SAINT-FOY-SILLERY-CAP-ROUGE	35 %	38 %
VILLE DE QUEBEC	32 %	54 %

Source : Ville de Québec : *Vision de l'Arbre, 2016*

** La couronne forestière réfère à la canopée qui se trouve hors du périmètre urbain de la ville, mais dans les limites territoriales de la ville de Québec, particulièrement au nord (voir figure 1)

2.2.2 LES ARBRES URBAINS GÉRÉS PAR LA VILLE DE QUÉBEC

Les arbres publics et privés couvrent 32 % (~75 km²) de la surface du périmètre urbain de la Ville de Québec. De ce nombre, environ 103 000 sont des arbres municipaux de rue ou plantés dans des parcs gérés par la Ville de Québec. Ensemble, ils couvrent une superficie de ~5 km². Ces arbres municipaux sont surtout présents dans les arrondissements de La Cité-Limoilou, Les Rivières et Sainte-Foy–Sillery-Cap-Rouge (Figure 3a). La densité des arbres plantés sur le domaine public est la plus élevée à La Cité-Limoilou (11,9 arbres/ha), suivi de Les Rivières (5,2 arbres/ha), puis de Sainte-Foy–Sillery-Cap-Rouge (4,3 arbres/ha). En comparaison, Charlesbourg, La Haute-Saint-Charles et Beauport ont une densité respective de 2,9, 1,6 et 1,6 arbre/ha (Figure 3b et c). Dans La Cité-Limoilou, en particulier, une grande partie de la forêt urbaine est constituée d'arbres municipaux. À l'échelle du Périmètre urbain, les arbres municipaux constituent plus de 40% du couvert forestier (Tableau 3).

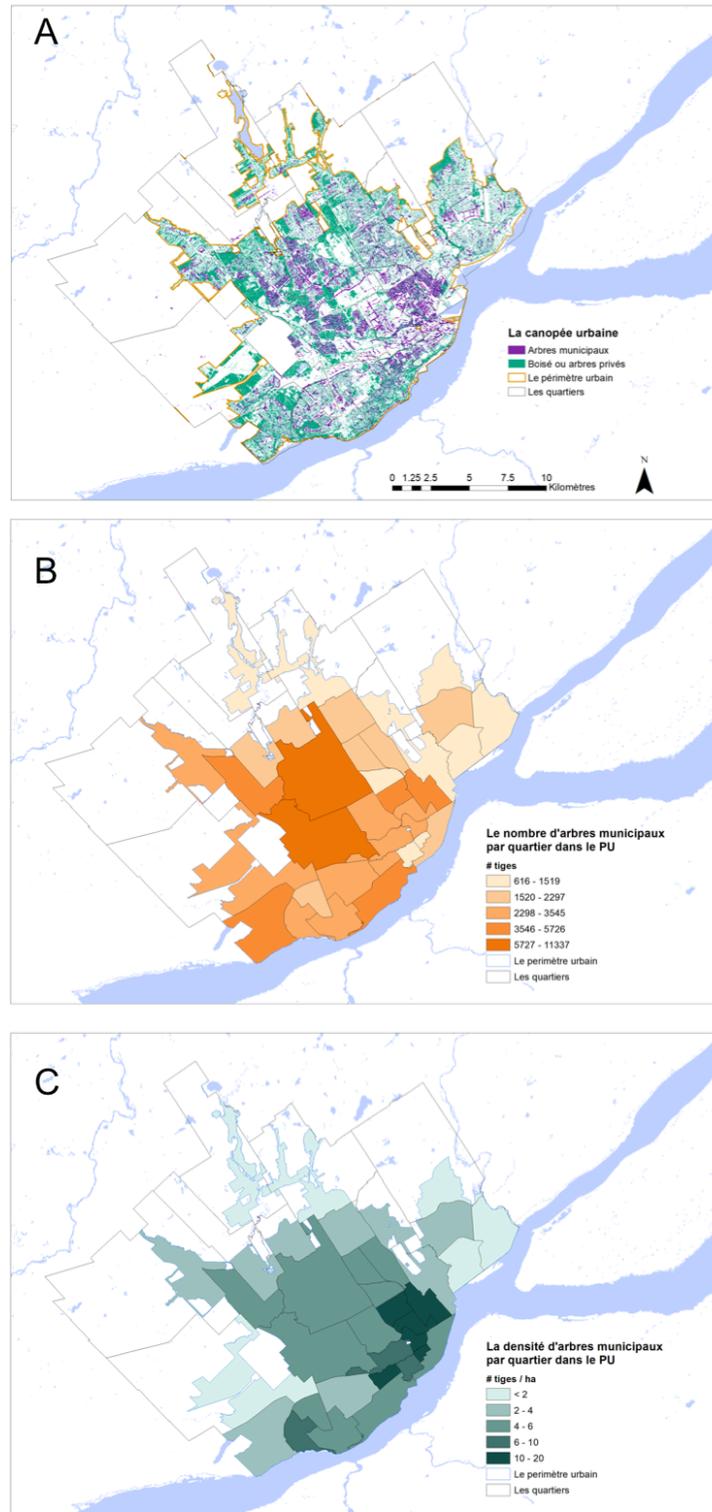


Figure 2 – Répartition des arbres municipaux dans (A) le périmètre urbain de la ville de Québec; (B) Nombre d'arbres municipaux par quartier et (C) Densité d'arbres municipaux par quartier dans la Ville de Québec.

Tableau 3 – Nombre et aire des arbres municipaux dans les quartiers et arrondissements de la Ville de Québec et le couvert forestier (CF) dans la périmètre urbain

ARRONDISSEMENT	QUARTIER	Nb. ARBRE	AIRE (Ha)	% du CF	CF dans PU (Ha)	ARRONDISSEMENT	QUARTIER	Nb. ARBRE	AIRE (Ha)	% du CF	CF dans PU (Ha)
BEAUPORT	CHUTES-MONTMORENCY	1 442	8,8	5,6	156,0	LA CITÉ-LIMOILOU	SAINT-JEAN-BAPTISTE	749	4,7	77	6,9
	VIEUX-MOULIN	1 519	6,6	5,1	128,5		MAIZERETS	5 726	34,6	45,3	76,3
	QUARTIER 5-4	1 260	9,0	6,4	140,1		MONTCALM	1 304	11,7	29,8	39,3
	QUARTIER 5-2	2 297	3,3	1,4	237,5		SAINT-ROCH	2 958	12,0	67,8	17,7
	QUARTIER 5-1	1 017	1,5	0,5	261,1		LAIRET	4 453	31,9	59,3	53,8
SOUS-TOTAL		7 535	29,2	3,2	923,2		SAINT-SACREMENT	2 604	19,0	44,5	42,7
CHARLES BOURG	JÉSUITES	1 967	14,7	12,4	118,3		VIEUX-LIMOILOU	3 318	18,9	62,8	30,1
	QUARTIER 4-2	1 856	10,4	3,9	264,6		SAINT-SAUVEUR	3 254	15,2	28,8	52,7
	QUARTIER 4-6	1 432	7,0	17	41,1		VIEUX-QUÉBEC/CAP-BLANC/COLLINE PARLEMENTAIRE	2 004	10,8	17,2	62,7
	QUARTIER 4-5	1 780	14,7	14,4	101,1		SOUS-TOTAL		26 370	158,8	41,5
	QUARTIER 4-3	1 327	2,7	1,6	166,8	LES RIVIERES	VANIER	3 545	7,1	9,1	77,7
	NOTRE-DAME-DES-LAURENTIDES	1 189	1,6	0,3	437,9		DUBERGER-LES SAULES	10 602	67,9	12,1	560,1
SOUS-TOTAL		9 551	51	4,5	1 129,8	NEUFCHATEL-EST/LEBOURGNEUF	11 337	34,6	4,4	794,5	
SAINTE FOY-SILLERY-CAP-ROUGE	L'AÉROPORT	3 272	12,7	1,9	653,1	SOUS-TOTAL		25 484	109,6	7,7	1 432,3
	CITÉ-UNIVERSITAIRE	2 961	15,6	9,0	172,5	LA HAUTE-SAINT-CHARLES	LORETTEVILLE	2 114	10,8	4,2	260,2
	CAP-ROUGE	4 430	20,3	3,8	539,8		SAINT-ÉMILE	1 811	2,6	1,5	168,7
	PLATEAU	1 657	8,5	11,7	72,3		VAL-BELAIR	3 115	4,4	1,1	397,0
	POINTE-DE-SAINTE-FOY	3 468	14,8	8,3	178,8		LAC-SAINT-CHARLES	616	1,5	0,4	279,1
	SILLERY	3 884	26,0	8,7	299,2		DES CHÂTELS	4 139	21,6	4,7	459,5
	SAINT-LOUIS	2 622	11,6	6,9	168,8		SOUS-TOTAL		11 795	40,9	2,5
SOUS-TOTAL		22 294	109,5	5,3	2 084,5						

Tableau 4 – Abondance et surface foliaire des espèces dominantes

ESPÈCES	POP %	SURFACE FOLIAIRE %
ÉRABLE NORVÈGE	14,9	21,4
ÉRABLE ARGENTÉ	7,1	15,6
FRÊNE ROUGE	6,4	7,5
CHÊNE ROUGE	4,6	3,4
ÉRABLE ROUGE	4,1	2,5
ORME D'AMÉRIQUE	2,7	8,3
TOTAL	39,8 %	58,7 %

Les arbres de rue et les arbres dans les parcs, ci-après nommés arbres municipaux, sont gérés par la Ville de Québec. Cette canopée municipale comprend une communauté riche et diversifiée incluant 187 espèces d'arbres et plus de 300 variétés réparties dans toute la ville. Les essences dominantes sont notamment les érables, les frênes et les chênes. Les sept espèces les plus abondantes représentent 39,8 % des arbres municipaux et 58,7 % de la surface foliaire de la ville (tableau 4). La diversité des espèces et la répartition entre ces espèces est élevée en comparaison avec d'autres grandes villes comme Montréal ou Paris, où 50 % de la surface foliaire est atteint avec seulement 5 espèces. Malgré une grande diversité des espèces, 50% des arbres municipaux présents sur le territoire de la Ville de Québec sont représentés par seulement trois espèces, soit *Acer*, *Fraxinus* et *Quercus*.

Globalement, les arbres appartenant au genre érable (*Acer*) représentent 34 % des arbres urbains municipaux, tandis que le genre frêne (*Fraxinus*) représente 11,7 % (Figure 4). L'érable de Norvège, *Acer platanoides* (14,9%), l'érable argenté, *Acer saccharinum* (7,1 %) et l'érable rouge, *Acer rubra* (4,1 %) sont les espèces d'érable les plus abondantes, tandis que le frêne rouge, *Fraxinus pennsylvanica* (6,4 %), est l'espèce de frêne la plus répandue (Tableau 4). En raison de leur abondance et de la grande taille de leurs cimes, ces espèces contribuent de manière beaucoup plus importante au couvert forestier urbain et aux avantages que les habitants tirent des arbres urbains. Cependant, la dominance de la forêt urbaine par un petit nombre d'espèces peut rendre le couvert végétal plus vulnérable aux facteurs de stress à grande échelle tels que les ravageurs forestiers, comme l'agrile du frêne. Une forêt saine et résiliente dépend d'une grande diversité d'espèces adaptées aux conditions biotiques et abiotiques locales pour résister à de telles pressions. La diversité fonctionnelle, c'est-à-dire la diversité des espèces en termes de leurs caractéristiques fonctionnelles, s'inscrit aujourd'hui comme un critère de gestion d'une canopée urbaine durable et résiliente (Craven et al. 2016). Une diversité fonctionnelle élevée aide à maintenir la résilience de la forêt face à des pressions multiples, notamment des conditions climatiques extrêmes ou de nouveaux ravageurs.

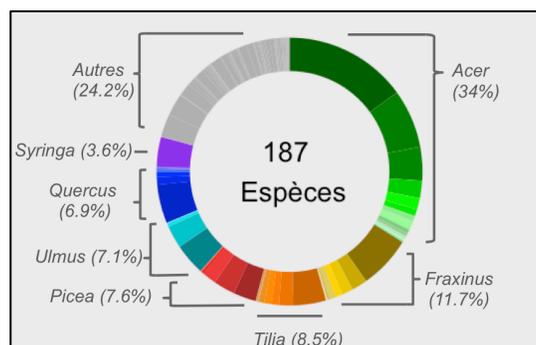


Figure 3 – La distribution des espèces des arbres municipaux de la Ville de Québec

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 LE CALCUL DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les arbres fournissent de nombreux services écosystémiques aux résidents des villes. Les forêts urbaines ont à la fois des valeurs fonctionnelles basées sur le flux de services écosystémiques fournis par l'arbre et une valeur structurelle basée sur la présence de l'arbre dans le paysage urbain. Les services fonctionnels sont produits à travers un fonctionnement écologique qui apporte un/des bénéfice(s) pour les êtres humains. Ces services incluent les services de séquestration de carbone, de contrôle des eaux de ruissellement, de réduction de la pollution aérienne, et de refroidissement de l'air et économie d'énergie. Les services structurels sont produits à travers la présence et forme physique d'un écosystème ou élément naturel (ex. arbre). Ces biens et services incluent les services esthétiques, spirituels, patrimoniaux, sociaux, de stockage de carbone, etc. Dans l'ensemble, les grands arbres sains tendent à conférer les plus grandes valeurs structurelles et fonctionnelles.

Les prochains paragraphes décrivent les services écosystémiques évalués avec le logiciel iTree et le calcul de leurs valeurs économiques dans le cadre de la présente étude. Les détails supplémentaires sur l'inventaire des arbres municipaux, l'approche d'échantillonnage sur le terrain et le développement des équations pour estimer la taille d'un arbre selon son espèce et largeur de tronc comme données dans iTree sont disponibles dans les Annexes I et II.

3.2 SERVICES FONCTIONNELS

📌 Séquestration du carbone : Le dioxyde de carbone (CO_2) est le principal gaz à effet de serre contribuant au changement climatique. L'augmentation des niveaux de CO_2 dans l'atmosphère, causée en partie par la combustion de combustibles fossiles et le changement de la couverture terrestre, piège le rayonnement solaire dans la haute atmosphère, empêchant ainsi l'énergie de s'échapper et augmentant les températures globales. Depuis l'ère préindustrielle, les températures moyennes mondiales ont augmenté de plus de 1,1 °C par rapport aux niveaux préindustriels (WMO, 2018). À mesure que les plantes grandissent, elles absorbent le CO_2 de l'atmosphère et le convertissent en biomasse ligneuse par le biais du processus de photosynthèse. Ce processus physiologique permet de retirer le CO_2 de l'atmosphère temporairement stocké dans sa biomasse et ainsi réduire les impacts potentiels du changement climatique.

Les valeurs économiques pour les services écosystémiques basés sur le carbone (la séquestration et le stockage du carbone) sont dérivées du coût social du carbone (CSC). Le CSC représente les coûts potentiels associés aux émissions d'une tonne supplémentaire de CO_2 dans l'atmosphère. Le modèle i-Tree base cette estimation sur la valeur du CSC dérivée de la *US Environmental Protection Agency*. Cependant, nous appliquons la valeur du CSC calculé par le ministère de l'Environnement et du Changement climatique du Canada pour 2018, soit 42,93 \$/tonne d'équivalent CO_2 (MECC 2016).

💧 **Contrôle des eaux de ruissellement** : Les eaux de ruissellement en milieux urbains sont une source majeure de polluants dans les zones humides et les écosystèmes aquatiques. Ces eaux ajoutent une pression sur les infrastructures qui doivent transporter et traiter les eaux de pluie. Les arbres urbains et leurs canopées peuvent aider à réduire l'apport d'eaux au réseau de gestion pluviale grâce à plusieurs mécanismes:

- Les feuilles interceptent les précipitations et dirigent l'écoulement de l'eau le long de ses branches et du tronc, favorisant une infiltration de l'eau directement dans le sol. Ceci a pour effet de détourner l'eau des surfaces imperméables (ex. rue, trottoirs) vers les surfaces perméables et réduit le ruissellement urbain ;
- Les précipitations interceptées peuvent être ré-évaporées directement dans l'atmosphère au lieu de contribuer au ruissellement de surface ;
- Les arbres transpirent au fur et à mesure qu'ils respirent, ce qui rejette dans l'atmosphère de l'oxygène (O₂) et de l'eau (H₂O), puisant ainsi l'eau dans le sol et augmentant sa capacité d'absorption d'eau entre les épisodes de précipitations.

Les valeurs économiques par défaut des coûts évités en ruissellement urbain sont basées sur la *U.S. Forest Services Community Tree Guide Series* (McPherson et al. 1999, 2000, 2001, 2002, 2006a, 2006b, 2006c, 2007, 2010). Cette valeur correspond aux coûts évités de traitement et de gestion des eaux pluviales à l'échelle régionale aux États-Unis. Les valeurs dans le nord-est sont estimées à 0,01 \$USD/gallon ou 2,64 \$USD/m³. Sur la base des indicateurs de gestion de la Ville de Québec en 2014 (MAMOT 2015), nous appliquons un coût de transport en eaux pluviales (0,25\$/m³) et de traitement (0,16\$/m³) pour une valeur évitée du service de drainage des eaux pluviales de 0,41 \$CAD/m³.

⚙️ **Réduction de la pollution atmosphérique** : Les arbres peuvent servir de filtres efficaces pour réduire les polluants de l'air et les particules en suspension dans l'air, améliorant ainsi la qualité de l'air. De grandes surfaces de feuilles interceptent des particules (poussière, pollen, cendres) à leur surface, qui peuvent ensuite être transportées dans le sol par temps de pluie, en les retirant de l'air que nous respirons (Smith 1990). Les arbres absorbent également des polluants tels que l'ozone (O₃), le dioxyde d'azote (NO₂) et le dioxyde de soufre (SO₂) par l'intermédiaire de leurs feuilles, ce qui peut contribuer à réduire les niveaux de smog et autres irritants en suspension dans l'air (Fowler 1980, Murphy and Sigmon, 1990). Cependant, les arbres produisent et libèrent également dans l'air des composés organiques volatiles tels que l'isoprène et le monoprène, qui contribuent à la création d'ozone.

Les valeurs économiques sont calculées sur la base de l'incidence locale d'effets néfastes sur la santé et des coûts médians d'externalité. Le nombre d'effets néfastes sur la santé et la valeur économique associée sont calculés pour l'ozone, le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote et les particules de moins de 2,5 microns à l'aide des données du *Environmental Benefits Mapping and Analysis Program* (BenMAP) de la *U.S. Environmental Protection Agency* (Nowak et al. 2014). Le modèle utilise une approche de la fonction de dommage basée sur l'évolution locale de la concentration de la pollution et de la population. Le coût des externalités calculées aux États-Unis a été utilisé pour calculer la valeur de l'élimination du monoxyde de carbone (Murray et al. 1994) et convertis en dollars canadiens.

❄️ **Refroidissement de l'air et économie d'énergie** : Les arbres à côté des bâtiments font de l'ombre pendant les mois chauds de l'été, réduisant ainsi le besoin de climatisation, alors qu'en hiver, s'ils sont placés dans la direction du vent, les arbres agissent comme des brise-vent réduisant le besoin de chauffage. Le type d'arbre, sa taille et sa position relative par rapport aux bâtiments adjacents peuvent

avoir une incidence sur les besoins en chauffage et de même qu'un effet de climatisation pour les bâtiments.

- Les grands arbres ramifiés qui ombragent les fenêtres du côté sud-ouest et est permettent la circulation de l'air et peuvent aider à réduire les coûts de refroidissement en été de 4 à 47% (Huang et al. 1990, Kurn et al. 1994) ;
- Les conifères plus denses plantés du côté nord ou en direction des vents dominants réduisent le chauffage en hiver (EPA 2008) ;
- Plus généralement, les arbres qui ombragent de grandes surfaces pavées telles que des parcs de stationnement peuvent également contribuer à réduire les températures de l'air ambiant et les effets d'îlot de chaleur ;
- Les arbres libèrent de l'eau dans l'atmosphère par évapotranspiration, ce qui refroidit les températures de l'air localement, réduisant ainsi les effets d'îlot de chaleur.

La présence d'arbres urbains à proximité de bâtiments influencera les besoins énergétiques qui sont calculés à même le logiciel i-Tree. La variation des besoins en énergie générera deux bénéfices qui ont été quantifiés dans le cadre de cette analyse. Premièrement, la valeur des économies d'énergie est estimée. Pour calculer cette réduction, nous avons identifié les édifices les plus proches des arbres municipaux selon la couche vectorielle de l'empreinte des bâtiments dans la Ville de Québec, ce qui inclut les édifices privés et publics, ainsi que commerciaux et résidentiels. Les économies d'énergie (en kWh et BTU) ont ensuite été calculées sur la base des équations présentes dans i-Tree et converties en valeur économique en vertu des coûts énergétiques spécifiques au Québec. Au Québec, environ 85 % de l'énergie utilisée pour le chauffage ou la climatisation provient de l'hydroélectricité ou de l'éolien (Statistique Canada 2011). Le coût moyen de cette source d'énergie est de 0,06 \$/kWh. Pour la portion provenant des combustibles (gaz naturel, mazout et autres), nous avons employé la valeur par défaut dans i-Tree.

Deuxièmement, pour la réduction de la consommation énergétique provenant de l'énergie thermique (combustion), la valeur économique de la réduction des émissions de carbone produites est également quantifiée. Cette valeur est estimée en multipliant la réduction de la quantité de tonnes de gaz à effet de serre émise multipliée par la valeur d'une tonne de GES (42,93 \$/tonne).

3.3 SERVICES STRUCTURELS

Dans l'étude de la contribution des arbres au bien-être citoyen, il convient de considérer deux paramètres temporels. Dans un premier cas, nous retrouvons les services annuels, présentés à la section précédente, et qui réfèrent aux flux de services que les arbres produisent chaque année. Dans le second cas, nous faisons référence aux services structurels qui réfèrent aux bénéfices que les arbres fournissent naturellement de par leur présence sur le territoire. Ces services s'expriment par la présence des arbres urbains, dans les rues, les parcs ou ailleurs, et dont la valeur est le fruit d'une gestion de longue durée dans le territoire ciblé.

Ainsi, les fondements conceptuels des services structurels de la canopée urbaine s'appuient sur la notion de valeur d'existence d'un arbre. Elles intègrent donc la valeur des services rendus par ces arbres qui ne sont pas associés à des flux de services (comme la séquestration par exemple), mais plutôt sur un amalgame de services et d'attributs qui possèdent une valeur en soi (comme la valeur esthétique ou paysagère par exemple). La valeur des services structurels est donc fonction de la présence, du type et de la structure des arbres dans l'environnement urbain. En même temps, la forêt urbaine n'est pas un objet fixe, mais constitue un ensemble constamment en mutation, qui se renouvelle par la croissance, la mort

et la régénération naturelle et la plantation d'arbres. Cela veut dire que la valeur des services structurels est en constante évolution.

Afin de tenter de capturer la nature dynamique de la valeur structurelle et de tenter d'annualiser la valeur structurelle des arbres municipaux de la ville, nous posons certaines hypothèses d'estimation. Plus spécifiquement :

- Le DHP moyen dans l'inventaire : 24 cm
- Un taux de croissance moyen pour les arbres de la ville de Québec : 0,75 cm/an
- La durée de vie moyenne d'un arbre municipal : 32 ans

Cette dernière hypothèse suppose que la plupart des arbres seront remplacés sur une période de 32 ans, sauf pour quelques arbres anciens qui ont résisté aux extrêmes météorologiques, aux ravageurs ou au déplacement pour le développement ou autre intervention sur le domaine municipal. Ces hypothèses nous permettent de fournir une valeur annualisée de la valeur structurelle des arbres municipaux.

✂ **Stockage du carbone** : Le stockage de carbone, c'est le carbone emmagasiné dans la biomasse ligneuse des arbres. Chaque année, grâce à la séquestration du CO₂, du carbone est ajoutée dans la biomasse de l'arbre où il reste pour nombreuses années. En conséquence, les arbres et les forêts stockent d'énormes quantités de carbone dans leur biomasse qui seraient autrement dans l'atmosphère et contribueraient au changement climatique. Ce service consiste à emprisonner le carbone de l'atmosphère et contribue à réduire les impacts potentiels des changements climatiques. Similaire à la séquestration du carbone, la valeur économique du stockage se base sur le coût social du carbone. Afin d'annualiser cette valeur, nous divisons la valeur de stockage total du carbone par 32 ans, une estimation de la vie moyenne d'un arbre municipal.

❖ **Valeur culturelle** : De par leur présence dans un environnement particulier ou dans un paysage, les arbres fournissent de multiples services qui ont un caractère non marchand ou qui sont difficilement quantifiables. C'est le cas notamment de leur contribution esthétique à un paysage, de leur impact sur le bien-être et la santé des populations, du sentiment d'appartenance ou de leur signification historique ou patrimoniale. La présence d'un arbre possède donc une valeur intrinsèque en dehors des services fonctionnels qu'il fournit, mais cette valeur est davantage difficile à quantifier. Malgré tout, i-Tree fournit des estimations sur la valeur de cette composante en approximant la valeur culturelle d'un arbre (nommée « structurelle » dans le logiciel i-Tree), grâce à la méthode de quantification du coût de remplacement.

Le modèle i-Tree fournit une évaluation économique par défaut pour chaque service écosystémique. Afin de régionaliser les résultats qui seront produits par i-Tree au contexte spécifique de la Ville de Québec, plusieurs des paramètres et hypothèses par défaut du logiciel ont été ajustés en vertu des informations relatives aux éléments à quantifier. Pour certains services écosystémiques, nous continuons à nous appuyer sur les valeurs par défaut, car nous n'avons pas de données ou d'informations spécifiques au Québec pour régionaliser la valeur de ces services. Les modifications apportées au modèle i-Tree sont détaillées ci-dessous.

L'estimation de la valeur des services culturels est basée sur l'approche du coût de remplacement d'un arbre équivalent. Pour estimer ce coût, i-Tree se base sur quatre caractéristiques de l'arbre: essence, taille, santé et emplacement selon les directives établies par le *US Council of Tree and Landscape*

Arborists (1992). Les grands arbres en bon état et situés à des emplacements stratégiques ont généralement des valeurs culturelles et donc des coûts de remplacement plus élevés.

Tableau 5 – Valeurs économiques fournies et appliquées à la production des services écosystémiques de i-Tree

SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE	VALEUR i-TREE (\$CAD)	VALEUR APPLIQUÉE (\$CAD)
VALEURS FONCTIONNELLES		
SÉQUESTRATION DE CARBONE	114,87 \$/ tn C	157,55 \$/tn C
EAUX DE RUISSELLEMENT	3,41 \$/m ³	0,41 \$/m ³
COÛT D'ÉLECTRICITÉ	0,06 \$/kWh	0,06 \$/kWh
COÛT DE CHAUFFAGE THERMIQUE	19,34 \$/MBTU	19,34 \$/MBTU
ÉMISSIONS DE CARBONE ÉVITÉ	114,87 \$/ tn C	157,55 \$/tn C
POLLUANT ATMOSPHERIQUE		
Monoxyde de carbone (CO)	1,49 \$/kg	1,49 \$/kg
Ozone (O ₃)	5,28 \$/kg	5,28 \$/kg
Dioxyde de soufre (SO ₂)	0,29 \$/kg	0,29 \$/kg
Matière particulaire (Pm2.5)	183,38 \$/kg	183,38 \$/kg
Dioxyde d'azote (NO ₂)	0,79 \$/kg	0,79 \$/kg
VALEURS STRUCTURELLES		
STOCKAGE DE CARBONE	114,87 \$/tn	157,55 \$/tn/32 ans
VALEUR CULTURELLE	Variable	Variable/32 ans

La valeur culturelle est estimée selon les facteurs locaux de l'espèce, le coût moyen de remplacement, et la taille transplantable. Les prix de remplacement sont pris des publications de l'*International Society of Arboriculture*, qui sont définis selon le prix de base de remplacement (\$/unité transversale) d'un arbre d'une espèce et d'une taille équivalente. Cette valeur est ensuite multipliée par les cotes d'emplacement et de condition (0-1) pour estimer la valeur de base des arbres (Nowak et al. 2002). La valeur de base minimale d'un arbre de remplacement (diamètre de 2,54 cm) avant ces ajustements a été fixée à 150 \$. Les cotes de localisation (type d'utilisation du sol) et d'état de santé de la couronne sont obtenues auprès de la *International Society of Arboriculture* pour chaque État (ISA 1988, voir Nowak et al. 2002). Pour les arbres plus grands que la taille maximale transplantable, la formule suivante est utilisée :

$$\text{Valeur de base} = \text{coût de remplacement} + [\text{Prix de base} \times (TA_A - TA_R) \times \text{valeur de l'espèce}]$$

Lorsque le coût de remplacement correspond à la plus grande taille transplantable, le prix de base est le coût moyen local par unité de surface de tronc (\$/cm²), TA_A est la zone de tronc évaluée et TA_R est la surface de tronc du plus grand arbre transplantable. Nous divisons la valeur culturelle par 32 ans, une estimation de la durée de vie moyenne d'un arbre urbain, pour le rapporter sur une valeur annuelle.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 LA VALEUR DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES FONCTIONNELS

4.1.1 L'ATTÉNUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les arbres jouent un rôle important dans l'atténuation du changement climatique en séquestrant le CO₂. Grâce au processus de photosynthèse, les arbres absorbent le CO₂ et l'intègrent dans la nouvelle biomasse ligneuse de leurs troncs. Sur le territoire de la Ville de Québec, 650,5 nouvelles tonnes de carbone sont séquestrées par les arbres municipaux chaque année, ce qui contribue à réduire les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et à compenser les émissions d'autres activités (comme la combustion de combustibles fossiles). Sur la base du coût social du carbone, la séquestration annuelle de carbone est évaluée à 102 487\$/an.

Le taux de séquestration est lié à la quantité de nouvelle biomasse qu'un arbre peut produire chaque année. Malgré la croissance rapide de petits arbres, les plus gros arbres séquestrent généralement plus de carbone chaque année. Par exemple, Nowak (1994) a constaté que les grands arbres en santé (> 77 cm de diamètre) séquestrent temporairement environ 90 fois plus de carbone que les petits arbres en santé de moins de 8 cm de diamètre. D'après l'abondance et la taille des arbres au Québec, nous constatons que, dans toute la ville, la séquestration la plus importante de carbone se produit dans la cohorte d'arbres d'un diamètre compris entre 50 et 70 cm (figure 5). Les taux moyens les plus élevés de séquestration du carbone (9-10 kg C moyen/arbre) sont observés aux alentours de Montcalm, Saint-Sacrement, et Sillery, où se trouvent un grand nombre de gros arbres. Toutefois, la plus grande quantité de carbone séquestré se trouve à Duberger-Les Saules, Neufchatel-Est/Lebourgneuf, Lairet et Maizeret en raison du nombre beaucoup plus élevé d'arbres (tableau 3) et des plus grandes surfaces basales totales des tiges.

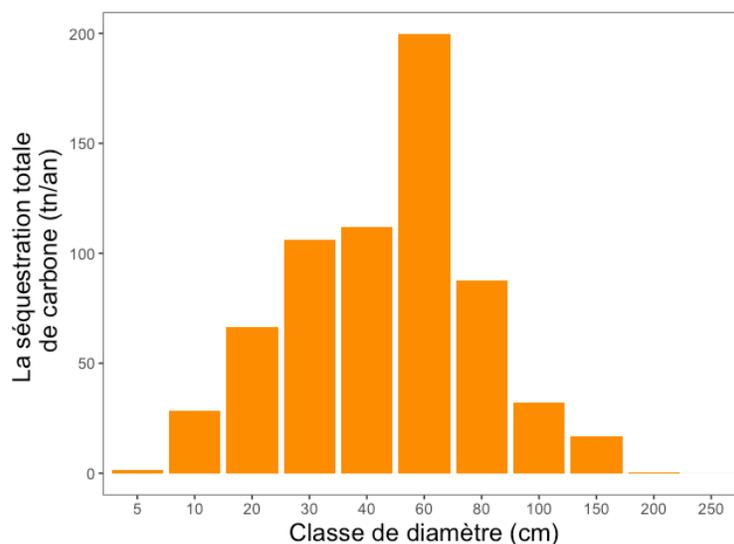


Figure 4 – Séquestration totale de carbone par les arbres municipaux par classe de diamètre

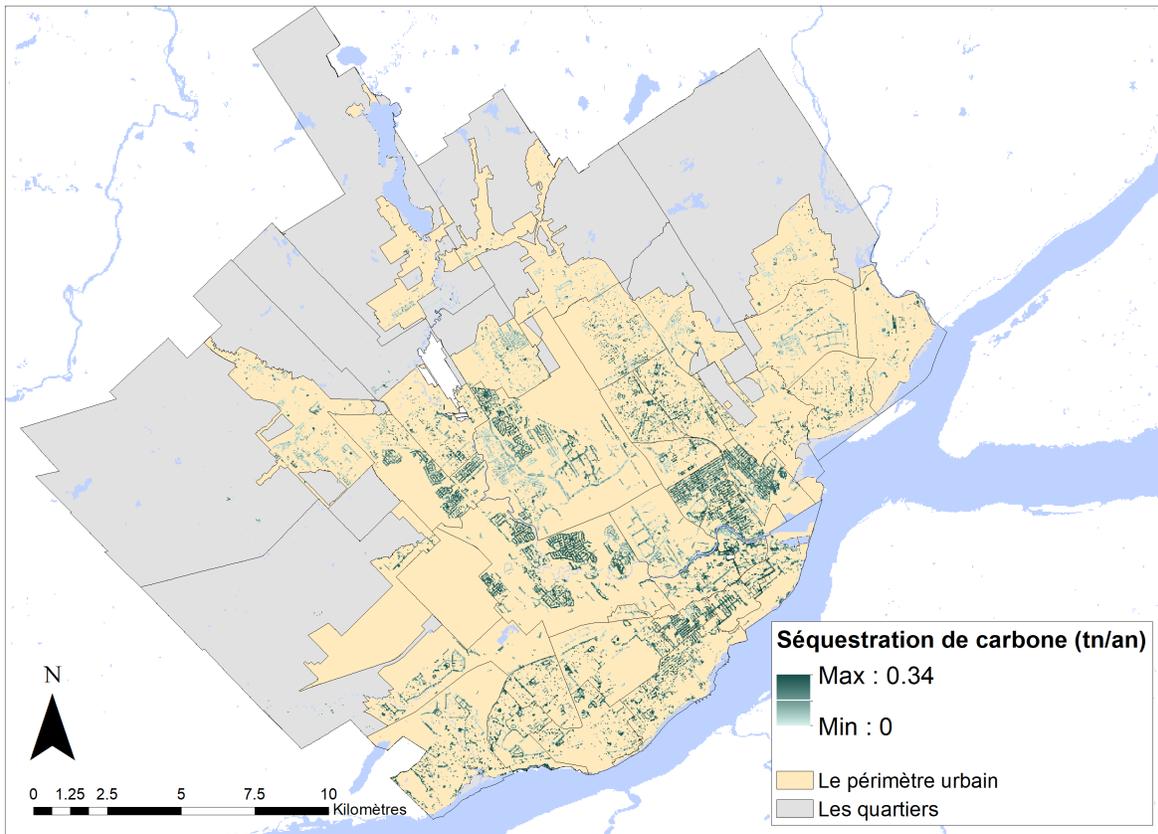


Figure 5 – Répartition du taux de séquestration de carbone par les arbres urbains dans la Ville de Québec

4.1.2 LA CONTRIBUTION DES ARBRES MUNICIPAUX À LA RÉGULATION DE LA TEMPÉRATURE

✿ À Québec, la présence d'arbres municipaux à proximité des bâtiments contribue à réduire les besoins en énergie pour la climatisation résidentielle de 801 785 kWh pendant les mois d'été, permettant ainsi d'économiser 48 107 \$ par an en coûts d'électricité. Pendant les mois d'hiver, le blocage des vents par les arbres réduit les dépenses de chauffage des ménages. Les résultats suggèrent que les besoins en énergie pour le chauffage sont réduits de 2 486 MBTU/an et 4 129 MWh/an, ce qui représente une économie de 295 824 \$/an. En combinant les économies d'énergie provenant de la réduction du chauffage et de la climatisation, les arbres municipaux génèrent 343 931\$ par an d'économies d'énergie dans les bâtiments privés et publics de la Ville de Québec.

Par ailleurs, les économies en énergie provenant de combustibles fossiles réduisent la quantité de carbone émis dans l'atmosphère. La réduction des 2 486 MBTU génère une diminution de 547 tonnes d'émissions de carbone par année. La valeur économique correspondant à cette diminution des gaz à effet de serre est de 86 110 \$/an.

Les arbres réduisent également la température de l'air ambiant dans les villes grâce au refroidissement par évapotranspiration, les arbres libérant de l'eau à travers leurs feuilles dans l'air lors de leur respiration. Cela a pour effet d'abaisser les températures locales, ce qui a été mesuré, seul ou en combinaison avec l'ombre, à hauteur de 1 à 5 ° C (Huang et al. 1990, Kurn et al. 1994). Aux quatre coins de la Ville de Québec, les arbres municipaux rejettent 755 271 m³ d'eau dans l'atmosphère par évapotranspiration pendant les mois d'été (Figure 6). Bien que le modèle i-Tree ne traduise pas ces effets en changement de température ou en valeur économique (cela nécessite un modèle plus complexe de la température et de la circulation de l'air au centre-ville), nous pouvons visualiser cet effet à travers la ville où l'évapotranspiration contribue le plus au refroidissement (**Figure 6 – Répartition temporelle de l'évapotranspiration et la température au cours de l'année (A) et Répartition spatial de l'évapotranspiration d'eau par les arbres municipaux (B) dans la Ville de Québec**). Le refroidissement des températures en ville implique également une diminution des coûts de santé publique. L'impact de la chaleur, amplifiée par les phénomènes d'îlots de chaleur urbains, génère des problèmes de santé importants qui peuvent aller jusqu'à la mort. Par exemple, lors de la dernière canicule qui a sévi sur le Québec à l'été 2018, plus de 70 personnes sont mortes, dont au moins trois résidaient à la Ville de Québec. L'effet climatisant des arbres devrait permettre une réduction des problèmes de santé liés à la chaleur. Toutefois, cette relation est complexe et n'a pas été évaluée dans le cadre de cette étude.

Tableau 6 – Variation des besoins en énergie provenant de la présence des arbres municipaux

	UNITÉ/AN	VALEUR UNITAIRE	VALEUR (\$)
CHAUFFAGE THERMIQUE	2 486 MBTU	19,34 \$/MBTU	48 084 \$
CHAUFFAGE ELECTRIQUE	4 129 003 kWh	0,06 \$/kWh	247 740 \$
CLIMATISATION	801 785 KWH	0,06 \$/kWh	48 107 \$
TOTAL			343 931 \$

Certains citoyens souffrent des effets des îlots de chaleur, qui se produisent lorsqu'une forte densité de béton sombre et de surfaces pavées dans les villes absorbent et retiennent davantage le rayonnement solaire que la végétation naturelle environnante. Cela augmente la température des villes par rapport à leur environnement, surtout la nuit lorsque l'environnement bâti libère une grande partie de l'énergie stockée durant la journée. Les îlots de chaleur ont été cartographiés pour la Ville de Québec par l'INSPQ (Institut national de la santé publique du Québec 2018). Si nous comparons l'emplacement de ces îlots de chaleur avec la présence de la canopée d'arbres, nous constatons que les îlots de chaleur les plus intenses se situent là où la couverture et l'évapotranspiration sont les plus faibles.

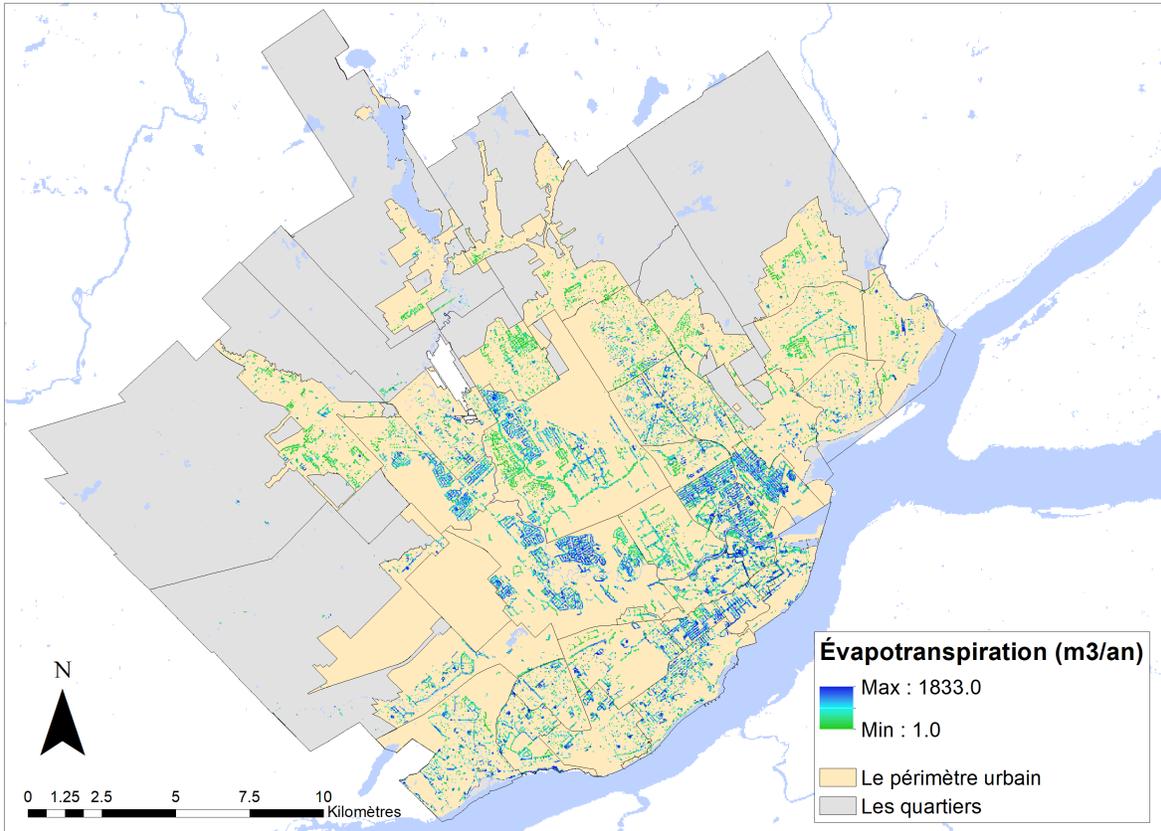


Figure 6 – Répartition temporelle de l'évapotranspiration et la température au cours de l'année (A) et Répartition spatiale de l'évapotranspiration d'eau par les arbres municipaux (B) dans la Ville de Québec

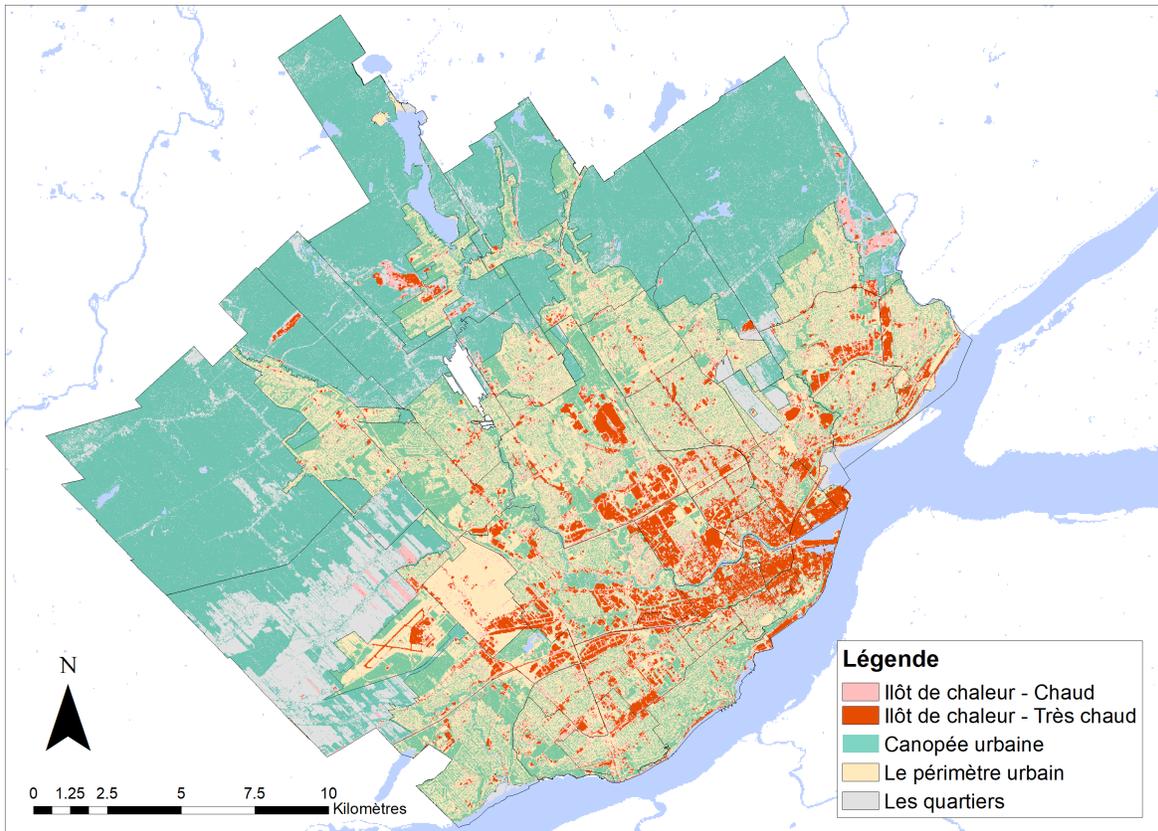


Figure 7 – Cartographie des îlots de chaleur urbains sur le territoire de la ville de Québec et répartition de la couverture forestière.

4.1.3 LE RUISSELLEMENT ÉVITÉ DES EAUX DE PLUIE

◆ La réduction en ruissellement est en fonction de la superficie en feuille d'un arbre, qui est elle-même liée de la taille de la canopée ainsi que de la taille des feuilles. Sur l'ensemble du territoire de la Ville de Québec, la canopée des arbres municipaux offrait une superficie totale de feuille équivalente à 23 km² ce qui a le potentiel de réduire de 62 930 m³ par an les eaux de ruissellement. Cette capture des eaux de ruissellement permet de réduire la pression exercée sur les réseaux d'égouts d'eaux pluviales et les stations d'épuration. Selon les indicateurs de gestion de la Ville de Québec, il coûte 0,25\$ de transport et 0,16\$ pour gérer un m³ d'eau qui transite dans le système d'égouts de la ville. Cela veut dire qu'en détournant 62 930 m³ par année, la Ville de Québec épargne 25 801 \$ qu'elle n'a pas à dépenser pour traiter les eaux de ruissellement qui aurait été canalisées vers le système en l'absence des arbres municipaux. Encore une fois, ces services sont les plus nombreux là où la densité d'arbres municipaux et la superficie des feuilles sont les plus grandes, comme par exemple dans les quartiers de Lairet, de Mazairet, de Neufchatel-Est/Lebourgneuf et de Duberger-Les Saules (Figure 8a). Considérant que les précipitations attendues seront en croissance en raison des changements climatiques, la valeur économique de la réduction des eaux de ruissellement sera également en croissance au cours des prochaines décennies.

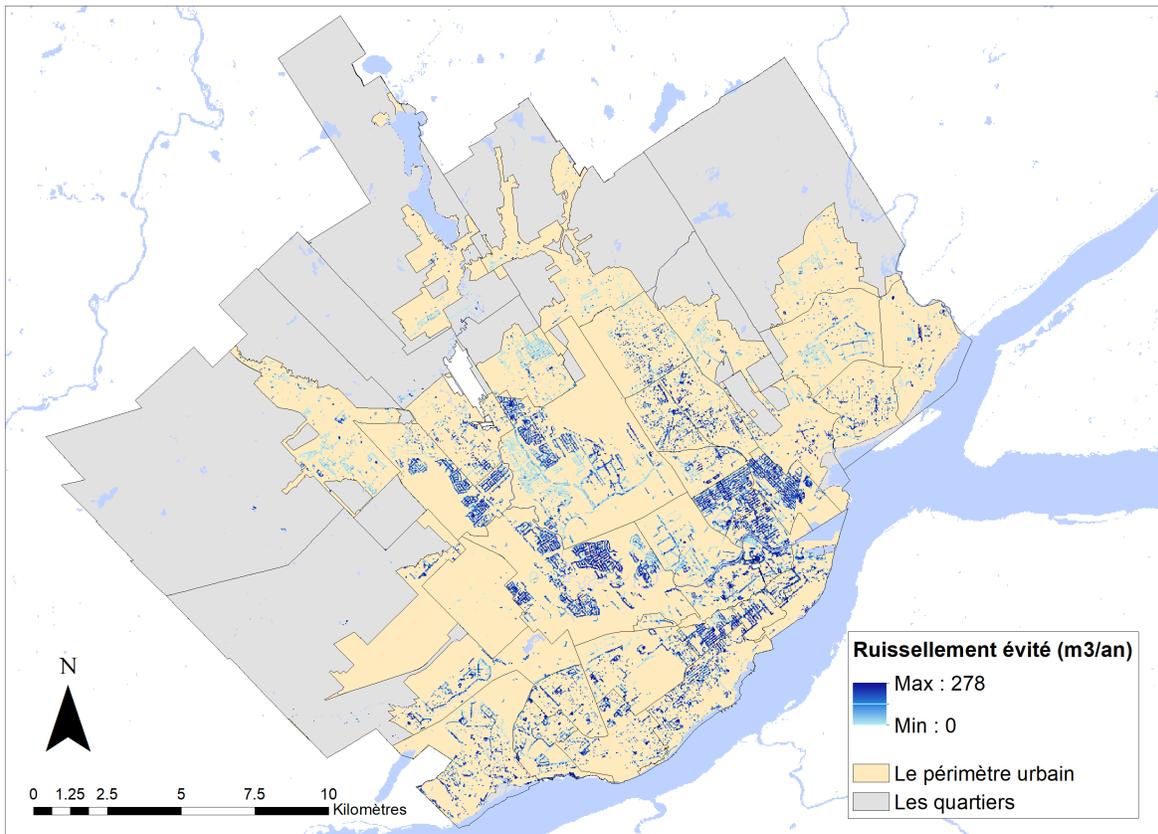


Figure 8 – Cartographie du ruissellement évité par les arbres urbains dans la Ville de Québec

4.1.4 L'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Les arbres agissent comme les poumons de la ville en filtrant les polluants et en produisant de l'oxygène. Au total, les arbres municipaux de la Ville de Québec éliminent environ 16,09 tonnes de polluants atmosphériques chaque année, ce qui représente un service d'une valeur de 71 489 \$ en évitant les effets néfastes sur la santé. En particulier, les arbres municipaux absorbent très efficacement l'ozone (O_3), un gaz essentiel à la création du smog, éliminant plus de 13 tonnes d'ozone par an. Les arbres ont également éliminé 406 kg de dioxyde de soufre (SO_2), 360 kg de monoxyde de carbone (CO), 2 186 kg de dioxyde d'azote (NO_2) et 1,2 kg de particules fines $<2,5 \mu m$ (Figure 9a).

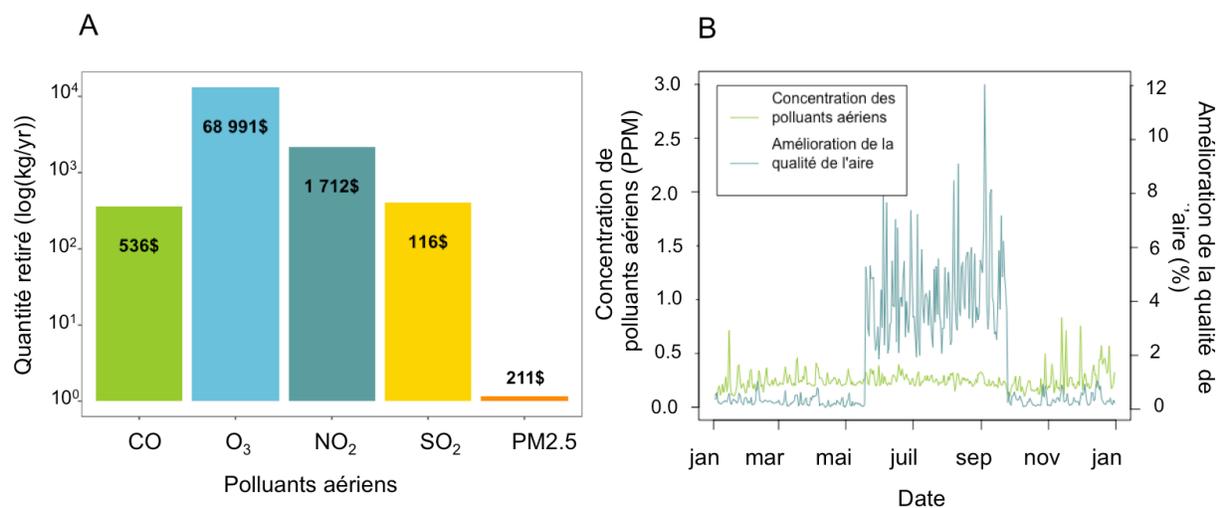


Figure 9 – Kilogrammes et valeur économique des polluants aériens retirés de l'air par les arbres municipaux (A) et l'amélioration de la qualité de l'air par les arbres municipaux de la Ville de Québec

Le potentiel d'amélioration de la qualité de l'air des arbres est optimal entre le mois de juin et la fin du mois de septembre au moment où ceux-ci sont en feuille (Figure 10B). Selon l'estimation de i-Tree, en moyenne, les arbres municipaux de la Ville de Québec améliorent la qualité de l'air de 4% pendant la majeure partie de l'été et jusqu'à 12% lors d'événements de qualité de l'air particulièrement médiocres, en réduisant les concentrations de polluants atmosphériques sur le territoire de la ville (Figure 11). En moyenne, les arbres avec de grandes canopées (ex. les érables, les frênes, les noyer ou chênes) et de grands index de surface foliaire, c'est-à-dire la quantité de surface de feuilles vertes unilatérale par unité de surface de sol, ont tendance à être les arbres les plus efficaces pour l'amélioration de la qualité de l'air en raison de leur grande surface de feuilles capable de piéger et d'échanger de plus grandes quantités de polluants.

En raison de leur abondance, leur grande taille et la surface foliaire, les cinq espèces qui contribuent le plus à l'amélioration de la qualité de l'air sur le territoire de la Ville de Québec sont l'érable de Norvège (*Acer platanoides*), l'érable argentée (*Acer saccharinum*), l'orme d'Amérique (*Ulmus americana*), le frêne rouge (*Fraxinus pennsylvanica*) et le tilleul à petits feuilles (*Tilia cordata*).

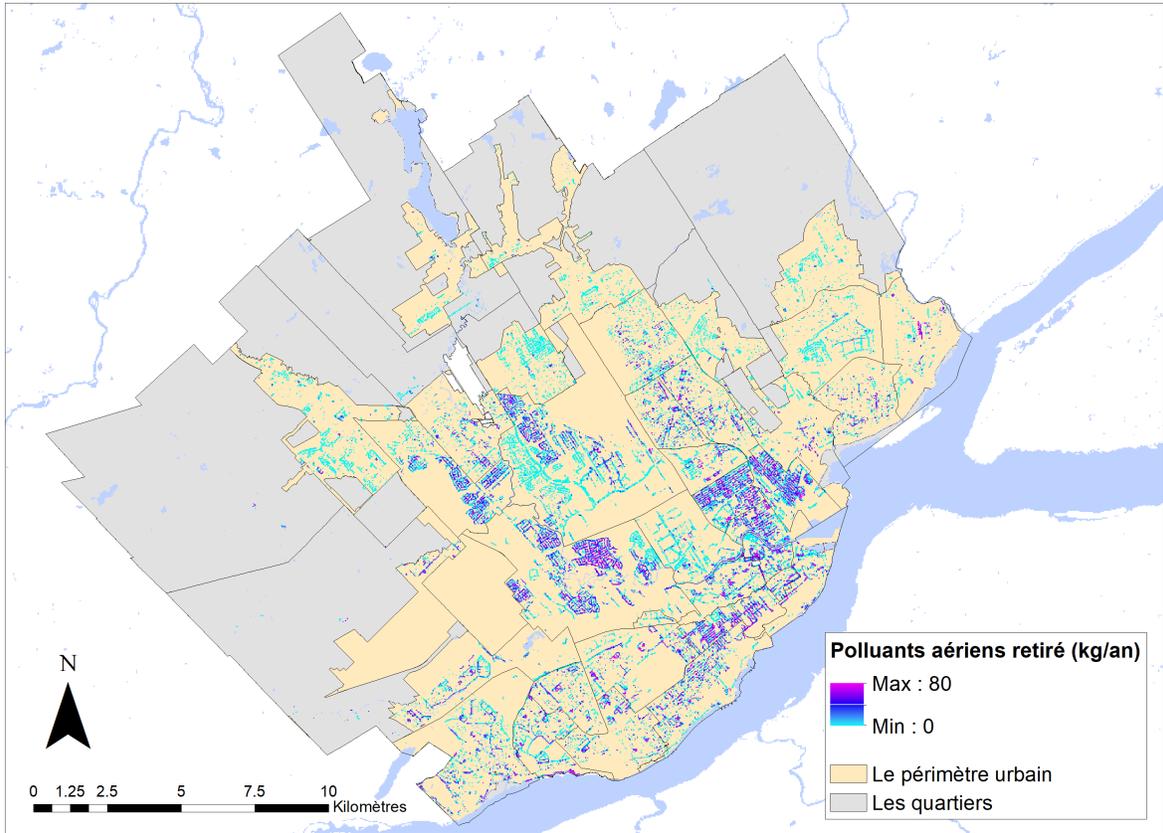


Figure 10 – Répartition du service d’amélioration de la qualité de l’air, en kilogrammes de polluants retirés par année.

4.2 LA VALEUR DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES STRUCTURELS

Les arbres apportent également des avantages moins tangibles aux citoyens incluant le stockage de carbone dans la biomasse, ainsi que de leur présence, de leur forme et de leur localisation dans les paysages. Dans ce rapport nous évaluerons les services structurels du stockage de carbone et la valeur culturelle des arbres municipaux.

LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ÉVALUÉS	
VALEURS FONCTIONNELLES	VALEURS STRUCTURELLES
SÉQUESTRATION DE CARBONE	STOCKAGE DE CARBONE
EAUX DE RUISSELLEMENT	VALEUR CULTURELLE
ÉPARGNE D'ÉNERGIE	
ÉMISSIONS DE CARBONE ÉVITÉ	
POLLUANT ATMOSPHÉRIQUE	

4.2.1 LE STOCKAGE DU CARBONE

✂ On estime que les arbres publics de la Ville de Québec stockent 23 595 tonnes de carbone dans leur biomasse, ce qui représente une valeur de 3,7 M\$ basée sur le coût social du carbone. Si on estime que les arbres urbains ont une durée de vie moyenne de 32 ans, on peut répartir le stock de carbone à 116 167\$/an. En raison de leur taille impressionnante et de leur abondance, l'érable argenté (*A. saccharinum*) et l'érable de Norvège (*A. platinoïdes*) sont les espèces qui stockent de loin la plus grande quantité de carbone dans la biomasse de leurs tiges à travers la ville. La quantité de carbone stocké est de 7 195 tonnes (1 133 000 \$) et 4 268 tonnes (672 000 \$) pour l'érable argenté et l'érable de Norvège respectivement. Les autres espèces ont en stock entre 0 et 2 000 tonnes de carbone.

Il est fort probable que la répartition de la biomasse et du carbone changera d'une manière importante dans les années à venir. L'érable de Norvège est une espèce envahissante dont la population est toujours en croissance alors que l'érable argenté est une espèce qui est moins valorisée comme arbre municipal en raison des problématiques liées à l'empiètement de ses racines. Finalement, la troisième espèce qui stocke le plus de carbone, soit le frêne rouge (*F. pennsylvanica*), est victime des impacts de l'agrile du frêne et verra sa population décroître au cours des prochaines années. Sans une stratégie de plantation adressant ces problématiques, il est attendu que la distribution de stockage de carbone se concentre de plus en plus dans les érables de Norvège.

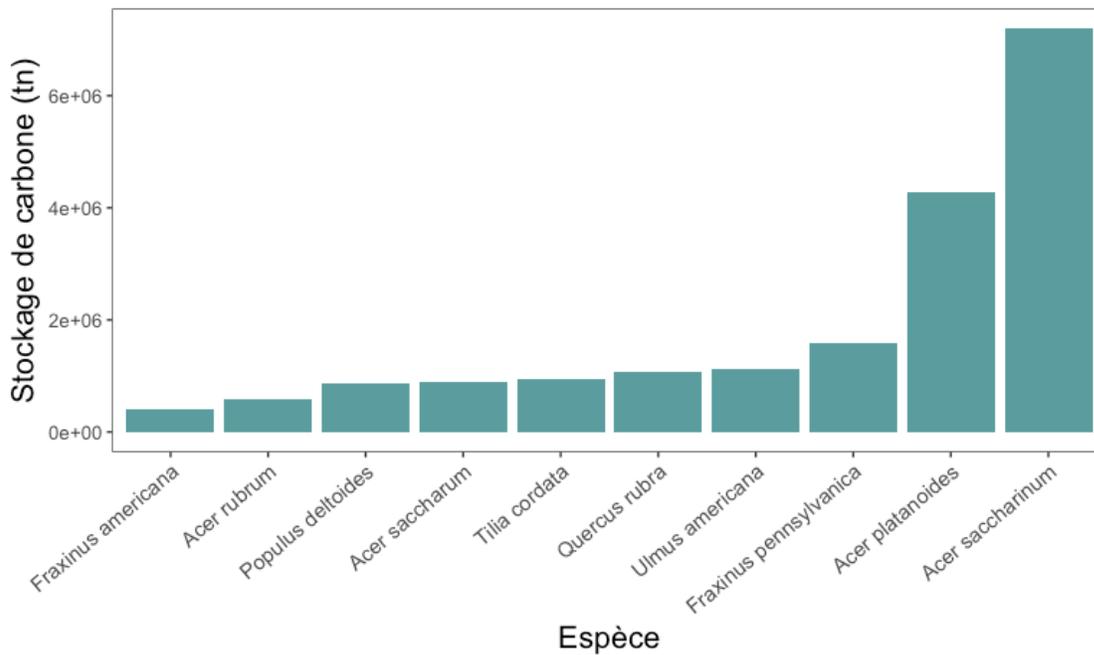
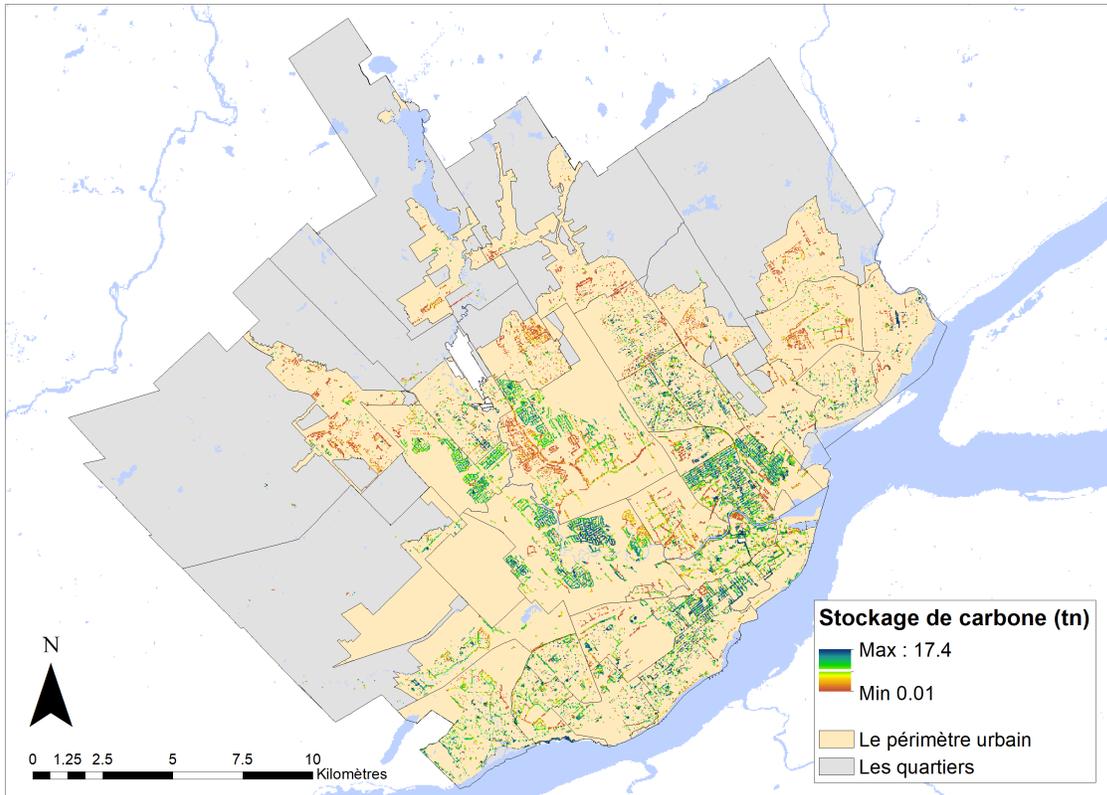


Figure 11 – Répartition du stockage de carbone dans les arbres municipaux dans la Ville de Québec (A) et les dix espèces d’arbres les plus importants en termes de stockage de carbone (B)

4.2.2 LA VALEUR CULTURELLE

❖ Les arbres urbains ne rendent pas seulement des services fonctionnels. La valeur culturelle vise à représenter la totalité des services associées aux valeurs de propriété, aux valeurs patrimoniales, aux valeurs esthétiques du paysage et aux valeurs générales du bien-être humain, notamment en offrant des lieux d'interaction sociale. Ces valeurs sont difficilement quantifiables avec les méthodes économiques standards. Dans le cadre de cette étude et selon les méthodes employées dans i-Tree, nous tentons de capturer cette valeur par la méthode du coût de remplacement. Ces valeurs sont dérivées d'évaluations professionnelles établies par les ingénieurs forestiers et paysagistes. La valeur culturelle de tous les arbres municipaux de la Ville de Québec est évaluée à 216 M\$, de loin la plus grande contribution économique à la valeur de la forêt urbaine. En répartissant, cette valeur sur la durée de vie moyenne des arbres (32 ans), nous arrivons à une contribution économique de 6,76 M\$ par année. Les grands arbres, en bonne santé, ont une plus grande valeur de remplacement et offrent de meilleurs services structurels à la communauté de Québec.

5. CONCLUSION

5.1 LA VALEUR ÉCONOMIQUE TOTALE DES ARBRES MUNICIPAUX

La valeur fonctionnelle des arbres municipaux à travers la Ville de Québec est évaluée à 629 818\$ par année en bénéfices économiques découlant des flux de services écosystémiques évalués dans le présent rapport. La valeur structurelle des arbres gérés par la Ville de Québec qui comprend la valeur culturelle et le stockage du carbone est évaluée à 219 M\$, dont 216 M\$ sont associés aux services culturels et 3 M\$ au service de stockage du carbone. En annualisant ces résultats en vertu d'une durée de vie moyenne des arbres en milieu urbain de 32 ans, la valeur annuelle des services culturelles est évaluée à 6,9 M\$.

Tableau 7 – Les valeurs fonctionnelles et structurelles totales pour les services écosystémiques des arbres municipaux de la Ville Québec

SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE		VALEUR
Valeur fonctionnelle		
	Séquestration de carbone	102 487 \$/an
	Épargne d'énergie	343 931 \$/an
	Émission de carbone évité	86 110 \$/an
	Ruissèlement évité	25 801 \$/an
	Polluant Aérien retiré	71 489 \$/an
	Sous-Total	629 818 \$/an
Valeur structurelle (sur 32 ans)		
	Stockage de carbone	116 167 \$/an
	Valeur culturelle	6 759 600 \$/an
	Sous-Total	6 875 767\$/an
	TOTAL	7 505 585\$/an

Bien que la contribution d'un arbre à la fourniture de services écosystémiques soit faible au cours d'une année donnée, sa fourniture cumulée sur toute sa durée de vie peut être beaucoup plus importante. Nous avons estimé la valeur d'un arbre tout au long de sa vie, mais en faisant la somme de tous les services fournis à chaque étape de sa courbe de croissance. Ceci fournit une estimation de la valeur totale de la prestation de services sur la courbe de croissance de l'espèce.

En utilisant cette approche, nous estimons qu'un érable de Norvège fournira en moyenne une totale de 245\$ en services annuels (i.e. séquestration, amélioration de la qualité de l'aire et ruissèlement évité) à mesure qu'il atteindra un diamètre de 60 cm. Cet arbre pourrait aussi contribuer à une réduction en coûts d'énergie résidentiel de ~400\$ au cours de sa vie si emplanter dans une position favorable. Pourtant, il pourrait aussi engendré des coûts additionnels en énergie de ~-280\$ si son emplacement empêche le soleil de réchauffer le bâtiment en hiver. Le moitié-point de cet éventail est 60 \$. Un frêne rouge fournira 166 \$ en services annuels à mesure qu'il atteindra une maturité de 70 cm de diamètre.

Dépendent de son emplacement, cette frêne pourrait apporté a peu près \$220 (–420\$ à 860\$) en réduction de cout de l'énergie résidentiel. Il n'est pas possible d'estimer la valeur structurelle d'un arbre au cours de sa durée de vie, car il s'agit d'une valeur fixée dans le temps en fonction de la taille, de la santé et de l'emplacement de l'arbre, qui augmente mais ne s'accumule pas dans le temps. À la taille maximale évaluée (60 cm DHP), un érable de Norvège peut avoir une valeur structurelle d'environ 8 500\$, tandis qu'un frêne rouge, d'un diamètre de 70 cm DHP, est d'environ 11 800\$.

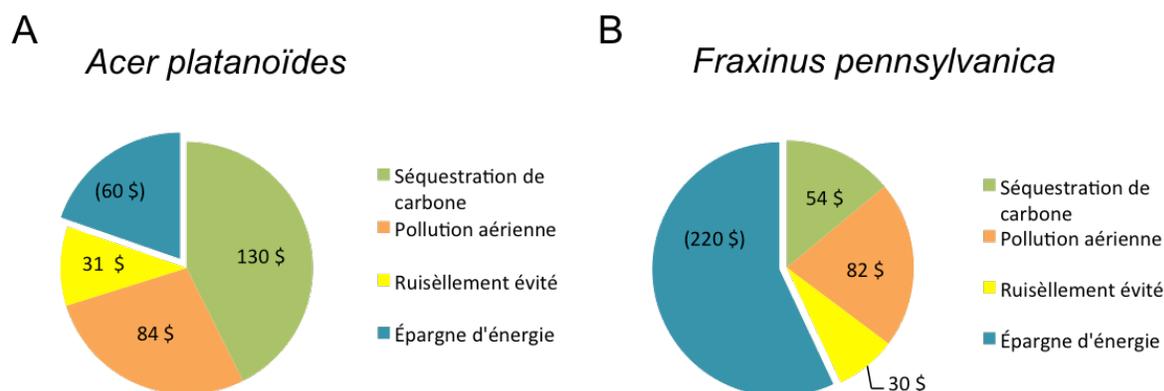


Figure 12 – La répartition approximative de la valeur des services écosystémiques rendu au cours de la vie d'un érable de Norvège, *Acer platanoïdes* (A) et frêne rouge, *Fraxinus pennsylvanica* (B)

5.2 LA VALEUR DE LA CANOPÉE URBAINE

Ce rapport a évalué la composition, la fonction et la valeur économique des services écosystémiques fournis par les arbres municipaux de la Ville de Québec. Ces arbres représentent une petite fraction du couvert forestier urbain total de la ville. Nous estimons que les arbres de rue et les espaces verts des parcs évalués ici représentent environ 6,7% de la canopée urbaine totale de la Ville de Québec, qui comprend aussi des arbres privés et des forêts publiques (voir l'annexe 3 pour des détails méthodologiques).

Afin de mieux comprendre les avantages de la forêt urbaine pour les citoyens de la Ville de Québec, nous extrapolons les résultats de l'analyse de l'inventaire d'arbres municipaux à toutes les zones de la canopée du périmètre urbain, sur la base d'estimations moyenne des services écosystémiques par hectare. Cet exercice nous fournis une estimation de la valeur des services rendus par tous les arbres présents sur le territoire de la ville. Il faut cependant préciser que cette extrapolation ne tient pas compte de la composition d'espèces, taille ou densité des arbres privés et des forêts publiques. Autrement dit, il est assumé que la composition et structure est similaire à celle des arbres municipaux.

Dans d'autres ville au Canada, on trouver que le choix d'arbres plantés sur les propriétés privées est influencé par les attitudes des propriétaires envers l'esthétisme qui favorise en générale les espèces ornementales et exotiques (Turner et al. 2005, Bourne et Conway 2014). Pourtant, nous ne trouvons pas nécessairement de différence dans la taille des tiges sur les propriétés privées ou publiques (Nitoslawski et Duinker 2016). Nous savons aussi de la littérature que les arbres en forêts stockent plus de carbone dans leur biomasse que ceux qui poussent dans les parcs étant donné leur haute densité de tiges et

structure aérienne plus étroite (McHale et al. 2009). Cependant, une revue de la littérature a démontré qu'il n'existe pas de grande différence entre la canopée forestière et celle des arbres urbains dans le captage de la précipitation (Centre pour la Protection des Bassins Versants 2017).

En tenant compte de ces différences, nous concluons qu'une extrapolation des données d'arbres municipaux au couvert forestier dans le périmètre urbain sur la base de provision moyenne de services par hectares peut nous donner une première approximation de la valeur totale de la canopée urbaine. Il est important de rester conscient qu'étant donné les différences potentielles en structure et composition, nos extrapolations peuvent arriver à des sous-estimations dans le cas de certains services (ex. le stockage de carbone) et à des surestimations pour d'autres services. Pour comptabiliser la valeur actuelle de la canopée urbaine, un effort d'échantillonnage sur les terrains privés et dans les zones boisées serait nécessaire pour déterminer les bonnes relations allométriques.

En extrapolant les données sur l'approvisionnement des services écosystémiques des arbres municipaux à la canopée urbaine, nous trouvons que :

🍃 **Séquestration de carbone :** La canopée urbaine de la Ville de Québec séquestre 9 788 tonnes de carbone par an, générant un bénéfice économique de plus de 1,5 M\$ par an.

💧 **Contrôle des eaux de ruissellement:** La canopée urbaine de la Ville de Québec réduit les eaux de ruissellement de 0,95 million de mètres cubes par an, faisant économiser à la ville environ 388 309 \$ en coûts évités d'entretien des infrastructures et de traitement de l'eau.

⚙️ **Réduction de la pollution:** Selon les estimations, le couvert forestier urbain complet filtre chaque année 242 tonnes de polluants atmosphériques, un service évalué à environ 1 M\$. La capacité relative à filtrer différents polluants dépend des essences, de la structure du couvert et du type de feuille. Notre estimation suppose que la composition en espèces des arbres privés et des zones boisées est similaire à celle de la base de données d'arbres municipaux, qui peut différer de leur composition réelle.

✂️ **Stockage de carbone:** Les forêts urbaines, les arbres privés et les arbres publics stocke 354 929 tonnes de carbone dans leur biomasse, un service évalué à 55 M\$. Les arbres à croissance libre et les arbres entretenus, sur lesquels le modèle i-Tree a été appliqué, ont généralement moins de biomasse et de carbone stockés que prévu par les équations des espèces dérivées des forêts (Nowak 1994). Le logiciel i-Tree s'adapte à cela en réduisant la biomasse et le stockage de carbone de 20 % dans chaque tige. Ainsi, les moyennes de stockage de carbone calculées ici et appliquées aux peuplements forestiers et aux zones boisées sont potentiellement sous-estimées par rapport à la valeur réelle du stockage de carbone. Nous divisons la somme estimée par 32 ans (la vie moyenne d'un arbre municipal) pour la reporter sur une valeur annuelle.

💎 **Valeur Culturelle :** Les arbres municipaux évalués ont une valeur culturelle d'environ 216 million de \$ ou une valeur moyenne de 433735 \$/ha de canopée. Extrapolant cette valeur à la totalité de la canopée urbaine nous arrivons à une valeur ~3.25 milliard de \$ en valeur culturelle. Pourtant, l'interprétation d'une valeur extrapolée sur la base de la superficie de canopée demande beaucoup de caution. La différence des services fonctionnels ou la valeur dépende sur le fonctionnement biophysique d'un arbre qui peut être liée à son taille et canopée, les valeurs culturelle est une reflection de la valeur que les humaines place sur les arbres selon leurs emplacements (parc, rue, privée), sa taille, sa santé et espèce. Sans avoir ces données, les extrapolations devraient être traité comme très approximatifs. Nous divisons

la somme estimée par 32 ans (la vie moyenne d'un arbre municipal) pour la reporter sur une valeur annuelle.

En totale, la valeur extrapolée de la canopée urbaine dans le périmètre urbain de la Ville de Québec est évaluée à 106 M\$ par année pour ses bénéfiques fonctionnels et structurels (tableau 8).

Ensemble, ces analyses démontrent que les arbres municipaux de la Ville de Québec, ainsi que la canopée urbaine, sont des ressources de grande valeur qui doivent être gérés de façon à pérenniser les services écosystémiques qui sont fournis. Les efforts visant à élargir la couverture de la canopée urbaine, comme planifiés dans la « Vision de l'arbre », contribueront à accroître la valeur et le flux de ces services. À mesure que les gestionnaires municipaux s'emploient à atteindre cet objectif, il est de plus en plus important de prendre en compte la manière dont la sélection des espèces peut affecter les flux de services écosystémiques locaux et comment ceux-ci peuvent être pérennisés sous les pressions croissantes du changement climatique et des ravageurs.

Tableau 8 – Les valeurs fonctionnelles et structurelles totales extrapolés/approximatives pour les services écosystémiques de la canopée urbain de la Ville de Québec

SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE	PRODUCTION du SÉ/ ha	CANOPÉE PUBLIQUE	CANOPÉE URBAINE	VALEUR ÉCONOMIQUE
		498 ha	7 500 ha	\$/an
Séquestration de Carbone	1,31 tn/ha	651 tn	9 788 tn	1 542 099 \$/an
Ruissellement Évité	126,30 m ³ /ha	62 930 m ³	947 096 m ³	388 309 \$/an
Polluant Aérien retiré*	3,23 kg/ha	16,1 tn	242 tn	1 098 680 \$/an
Économies d'énergie	--	--	--	NA
Valeur fonctionnelle totale				3 029 088 \$/an
Stockage de Carbone	47,3 tn/ha	23 595 tn	354 929 tn	55 919 064 \$
Valeur Culturelle	433 735 \$/ha	216 M\$	3.25 Millard \$	3 250 000 000 \$
Valeur structurelle totale * divisé par 32 ans				103 404 111 \$/an
VALEUR TOTALE				106 433 199\$/an

* une valeur monétaire moyenne pour le service de dépollution (4 540 \$/tn) a été estimée sur la base du rapport entre les coûts de santé évités et la composition des polluants éliminés par le couvert forestier municipaux

RÉFÉRENCES

- Ahern, J (2007) Green infrastructure for cities: the spatial dimension. *In Cities of the Future: Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*. IWA Publishing.
- Akbari, H, Kurn, DM, Bretz, SE and Hanford, JW (1997) Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and buildings*, 25(2):139-148.
- Akbari, H, Pomerantz, M and Taha, H (2001) Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, 70(3): 295-310.
- Alexander, C and DePratto, B (2014) Special report: the value of urban forests in cities across Canada. TD Economics. (consulté le 14 août 2018)
<https://www.td.com/document/PDF/economics/special/UrbanForestsInCanadianCities.pdf>
- Armson, D, Stringer, P and Ennos, AR (2013) The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3):282-286.
- Bissonnette, JF, Dupras, J, Messier, C, Gonzalez, A, Paquette, A, Lechowicz, M, Dagenais, D, Jaeger, J (2018) Moving forward in planning green infrastructures: Stakeholders identify opportunities and obstacles in the Greater Montreal Area (Quebec, Canada). *Cities*, 81:61-70.
- Bourne, KS, Conway, TM (2014) The influence of land use type and municipal context on urban tree species diversity. *Urban Ecosystems*, 17: 329–348.
- Bratman, GN, Hamilton, JP, Hahn, KS, Daily, GC and Gross, JJ (2015) Nature experience reduces rumination and subgenual prefrontal cortex activation. *Proceedings of the national academy of sciences*, 112(28):8567-8572.
- Center for Watershed Protection. 2017. Review of the Available Literature and Data on the Runoff and Pollutant Removal Capabilities of Urban Trees. Crediting Framework Product #1 for the project Making Urban Trees Count: A Project to Demonstrate the Role of Urban Trees in Achieving Regulatory Compliance for Clean Water. Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD.
- City of Edmonton (2012) Urban forest management plan: Taking root today for a sustainable tomorrow (consulté le 28 septembre 2018)
https://www.edmonton.ca/residential_neighbourhoods/PDF/Urban_Forest_Management_Plan.pdf
- Coley, RL, Sullivan, WC and Kuo, FE (1997) Where does community grow? The social context created by nature in urban public housing. *Environment and behavior*, 29(4):468-494.
- Council of Tree and Landscape Appraisers (1992) Guide for Plant Appraisal. International Society of Arboriculture, Savoy, IL. pp 103.

- Craven, D, Filotas, E, Angers, VA and Messier, C (2016) Evaluating resilience of tree communities in fragmented landscapes: linking functional response diversity with landscape connectivity. *Diversity and Distributions*, 22(5):505-518.
- Donovan, GH and Butry, DT (2009) The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use. *Energy and Buildings*, 41(6):662-668.
- Donovan, GH, Butry, DT, Michael, YL, Prestemon, JP, Liebhold, AM, Gatzliolis, D and Mao, MY (2013) The relationship between trees and human health: evidence from the spread of the emerald ash borer. *American journal of preventive medicine*, 44(2):139-145.
- Dupras, J, Alam, MJ, and Revéret JP (2015) Economic Value of Greater Montreal's Non-Market Ecosystem Services in a Land Use Management and Planning Perspective. *The Canadian Geographer/ Le Géographe Canadien*. 59(1):93-106.
- Foster, D and Duinker, P (2017) The HRM Urban Forest in 2016. Dalhousie University, School for Resource and Environmental Studies.
- Fowler, D., 1980. Removal of sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere in rain and by dry deposition. In: Drablos, D.T. (Ed.), *Ecological Impact of Acid Precipitation*. Proceedings of an International Conference, in Sandefjord, Norway. SNSF project, Oslo, Norway, pp. 22e32.
- Freer-Smith, PH, Holloway, S and Goodman, A (1997) The uptake of particulates by an urban woodland: site description and particulate composition. *Environmental Pollution*, 95(1): 27-35.
- Heisler, GM and Grant, RH (2000) Ultraviolet radiation in urban ecosystems with consideration of effects on human health. *Urban Ecosystems*, 4(3):193-229.
- Huang, YJ, Akbari, H and Taha, H (1990) The wind-shielding and shading effects of trees on residential heating and cooling requirements. *ASHRAE proceedings*, 96.
- Minister d'Énergie et Ressource Naturelles du Québec (MERN). 2013. La production d'électricité par source d'énergie (1986-2011) archive. Gouvernement de Québec. [consulte 28 septembre 2018]. <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-production-electricite.jsp>
- Institut National de la Santé Publique de Québec. 2018. Ilots de chaleur/fraicheur et température de surface. [consulté le 28 septembre 2018] <http://www.monclimatmasante.qc.ca/%C3%AEilots-de-chaleur.aspx>
- International Society of Arboriculture. 1988. *Valuation of Landscape Trees, Shrubs, and Other Plants*. International Society of Arboriculture, Champaign, IL. 50 pp.
- i-Tree Eco (2018). i-Tree Software Suite v6.0.10 Online. [consulté le 18 juillet 2018] <http://www.itreetools.org>
- Jiang, B, Chang, CY and Sullivan, WC (2014) A dose of nature: Tree cover, stress reduction, and gender differences. *Landscape and Urban Planning*, 132:26-36.

- Kurn, DM, Bretz, SE, Huang, B and Akbari, H (1994) The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling (No. LBL-35320). Lawrence Berkeley Lab., CA (United States).
- Lee, A.C. and Maheswaran, R (2011) The health benefits of urban green spaces: a review of the evidence. *Journal of public health*, 33(2):212-222.
- Maas, J, Van Dillen, SM, Verheij, RA and Groenewegen, PP (2009) Social contacts as a possible mechanism behind the relation between green space and health. *Health & Place*, 15(2): 586-595.
- McHale, MR, Burke, IC, Lefsky, MA, Peper PJ and McPherson, EG (2009) Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? *Urban Ecosystems*, 12:95-113.
- McNeil, J and Vava, C (2006) Oakville's Urban forest: Our solution to our pollution. Town of Oakville, Parks and Open Space Department, Forestry Section. [consulté le 13 aout, 2018]
<https://www.itreetools.org/resources/reports/Oakville's%20Urban%20Forest.pdf>
- McPherson, EG and Simpson, JR (1999) Carbon dioxide reduction through urban forestry: guidelines for professional and volunteer tree planters. Gen. Tech. Rep. PSW-171. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 237 p. Page 33
- McPherson, EG, Simpson, JR, Peper, PJ, and Xiao, Q (1999) Tree Guidelines for San Joaquin Valley Communities. Local Government Commission, Sacramento, CA.
- McPherson, EG, Simpson, JR, Peper, PJ, Scott, KI, and Xiao, Q (2000) Tree Guidelines for Coastal Southern California Communities. Local Government Commission, Sacramento, CA.
- McPherson, EG, Simpson, JR, Peper, PJ, Xiao, Q, Pittenger, DR, and Hodel, DR (2001) Tree Guidelines for Inland Empire Communities. Local Government Commission, Sacramento, CA.
- McPherson, EG, Maco, SE, Simpson, JR, Peper, PJ, Xiao, Q, VanDerZanden, AM, and Bell, N (2002) Western Washington and Oregon Community Tree Guide: Benefits, Costs, and Strategic Planting. International Society of Arboriculture, Pacific Northwest, Silverton, OR.
- McPherson, EG, Simpson, JR, Peper, PJ, Xiao, Q, Maco, SE, and Hoefer, PJ (2003) Northern Mountain and Prairie Community Tree Guide: Benefits, Costs and Strategic Planting. Center for Urban Forest Research, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.
- McPherson, E.G., Simpson, J.R., Peper, P.J., Gardner, S.L., Vargas, K.E., Maco, S.E., and Xiao, Q. 2006a. Coastal Plain Community Tree Guide: Benefits, Costs, and Strategic Planting PSW-GTR-201. USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.
- McPherson, EG, Simpson, JR, Peper, PJ, Maco, SE, Gardner, SL, Cozad, SK, and Xiao, Q (2006b) Midwest Community Tree Guide: Benefits, Costs and Strategic Planting PSW-GTR-199. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.

- McPherson, EG, Simpson, JR, Peper, PJ, Maco, SE, Gardner, SL, Vargas, KE, and Xiao, Q (2006c) Piedmont Community Tree Guide: Benefits, Costs, and Strategic Planting PSW-GTR 200. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.
- McPherson, EG, Simpson, JR, Peper, PJ, Gardner, SL, Vargas, KE, and Xiao, Q (2007) Northeast community tree guide: benefits, costs, and strategic planting.
- McPherson, EG, Simpson, JR, Peper, PJ, Crowell, AMN, and Xiao, Q (2010) Northern California coast community tree guide: benefits, costs, and strategic planting. PSW-GTR-228. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-228. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2005) Chapter 2: Ecosystems and their services. *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. [consulté le 24 juin 2018] <http://www.maweb.org/documents/document,p.300>
- Ministère d'Environnement et Changement Climatique (MECC) (2016) Mise à jour technique des estimations du coût social des gaz à effet de serre réalisées par Environnement et Changement Climatique Canada. Gouvernement du Canada. <http://ec.gc.ca/cc/default.asp?lang=fr&n=be705779-1>
- Ministere d'Affaires Municipales et Occupation du Territoire (MAMOT) (2015) Indicateurs de gestion 2014. Ville de Quebec. [consulté le 3 septembre 2018] https://www.ville.quebec.qc.ca/apropos/profil-financier/docs/indicateurs_gestion_2014.pdf
- Morris, N (2003) Health, well-being and open space. *Edinburgh: Edinburgh College of Art and Heriot-Watt University*.
- Murphy, C.E., Sigmon, J.T., 1990. Dry deposition of sulfur and nitrogen oxide gases to forest vegetation. In: Lindberg, S.E., Page, A.L., Norton, S.A. (Eds.), *Acid Precipitation, Sources, Deposition, and Canopy Interactions*, vol. 3. Springer-Verlag, New York, New York, pp. 217e240.
- Murray, FJ, Marsh L, and Bradford, PA (1994) New York State Energy Plan, *vol. II: issue reports*. Albany, NY: New York State Energy Office.
- Nitoslawski, SA and Duinker PA (2016) Managing tree diversity: A comparison of suburban development in two Canadian cities. *Forests*, 7(6):119.
- Nowak, DJ (1994) Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In: McPherson, E.G., Nowak, D.J., Rowntree, R.A. (Eds.), *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. USDA Forest Service General Technical Report NE-186, Radnor, PA, pp. 83–94.
- Nowak, DJ, Stevens, JC, Sisinni, SM and Luley, CJ (2002). Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture*. 28 (3): 113-122.

- Nowak, DJ, Crane, DE, Stevens, JC, Hoehn, RE, Walton, JT and Bond, J (2008) A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Arboriculture & Urban Forestry*, 24(6): 347-358.
- Nowak, DJ, Hirabayashi, S, Bodine, A and Greenfield, E (2014) Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193: 119-129.
- Nowak, DJ, Hoehn, RE, Bodine, AR, Greenfield, EJ, Ellis, A, Endreny, TA, Yang, Y, Zhou, T and Henry, R (2012) Assessing Urban Forest Effects and Values: Toronto's Urban Forest. United States Department of Agriculture, Forest Service. Resource Bulletin NRS-79. [consulté le 9 août 2018]
https://www.chesapeakebay.net/channel_files/23954/assessing_urban_forest_effects_and_values_toronto.pdf
- Nowak, DJ, Hirabayashi, S, Doyle, M, McGovern, M and Pasher, J (2018) Air pollution removal by urban forests in Canada and its effects on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29:40-48.
- Smith, W.H., 1990. *Air Pollution and Forest*. Springer-Verlag, New York.
- Statistics Canada Environment Accounts and Statistics Division Households and the Environment: Energy Use 2011. [consulté le 12 novembre 2018]
http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/statcan/11-526-s/11-526-s2013002-eng.pdf
- Streiling, S. and Matzarakis, A (2003) Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: a case study. *Journal of Arboriculture*, 29(6), pp.309-316.
- Turner, K, Lefler, L, and Freedman, B (2005) Plant communities of selected urbanized areas of Halifax, Nova Scotia, Canada. *Landscape and Urban Planning*, 71: 191–206.
- Ville de Québec (2016) Place aux arbres : Vision de l'arbre 2015-2025. [consulté le 23 mai 2018]
www.ville.quebec.qc.ca/apropos/planification-orientations/environnement/milieunaturels/docs/vision_arbre_2015_2025.pdf
- Ville de Québec (2018) Agrile du frêne: Plan d'Action 2018-2019 Plan de lutte à la propagation de l'agrile du frêne. [consulté le 14 septembre 2018]
<https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/propriete/arbres/agrile-frene/docs/agrile-frene-plan-action-2018-2019.pdf>
- World Meteorological Organization (WMO) (2018) WMO Statement on the State of the Global Climate 2017. WMO-No.1212. [consulté le 28 septembre 2018]
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4453

ANNEXE I – INVENTAIRE DES ARBRES MUNICIPAUX ET ECHANTILLONAGE SUR LE TERRAIN

Cette étude s'appuie sur l'utilisation de la base de données sur les arbres municipaux, créée par la Ville de Québec. L'inventaire des arbres publics est une base de données géoréférencée de tous les arbres de rue et arbres dans les parcs de la Ville de Québec. Au moment de produire cette étude, l'inventaire comptait 103 267 arbres urbains plantés et vivants. Cette base de données n'inclut pas les arbres sur les terrains gouvernementaux (Plaines d'Abraham, Parc du bois de Coulonge, etc.), dans les zones densément boisées des parcs de propriété municipale, ni dans les forêts publiques de la couronne forestière. Elle n'inclut pas non plus les arbres sur les propriétés privées.

Nous utilisons le modèle UFORE du *US Forest Service*, communément appelé i-Tree, pour évaluer les services écosystémiques fournis par les arbres municipaux. Nous appliquons en particulier le modèle i-Tree Eco v6 (i-Tree Eco 2018) en utilisant une approche d'inventaire complet. Au minimum, i-Tree exige que l'utilisateur fournisse l'espèce et le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) pour tous les arbres de l'inventaire. Pour améliorer les performances et la précision du modèle, il est vivement recommandé de fournir également les variables suivantes (pour une description de chaque variable, veuillez-vous reporter au guide¹ de terrain de i-Tree):

- Hauteur totale de l'arbre (m)
- Hauteur au sommet de la cime (m)
- Hauteur à la base de la cime (m)
- Largeur de la cime des arbres (m)
- Pourcentage de cime morte (%)
- Pourcentage du volume de la cime manquante (en raison de la croissance ou de la taille)
- Nombre de côtés du couvert avec exposition directe à la lumière (n = 1-5)
- Type d'utilisation du sol sur lequel se trouve l'arbre (14 classes)

Dans l'objectif de produire une estimation de la valeur des services écosystémiques rendus par les arbres municipaux de la Ville de Québec, nous paramétrons le modèle i-Tree de sorte à reproduire le plus fidèlement possible les conditions spécifiques de la Ville de Québec. Pour ce faire nous avons réalisé une collecte de données de terrain pour un sous-ensemble d'espèces de l'inventaire. Sur la base des entrées dans l'inventaire, nous avons généré un échantillon aléatoire stratifié de 40 arbres pour chacune des 70 espèces les plus abondantes, en fonction du diamètre, afin de collecter les mesures manquantes. Ensemble, ces espèces représentent 85 % de tous les arbres municipaux de la ville. Les arbres sélectionnés pour l'échantillonnage ont été visualisés dans ArcGIS grâce à leurs coordonnées x et y. Les points situés en dehors des limites administratives de la ville, ainsi qu'isolés loin des autres ont été remplacés par un autre tronc de la même espèce et de la taille plus mais située plus proche au centre ville. Au total, onze stagiaires en technologie forestière ou au baccalauréat en aménagement et environnement forestier qui effectuaient un stage à la Ville de Québec dans le domaine forestier en marge de leur cursus collégial ou universitaire ont échantillonné 2 352 arbres à travers la ville au courant des mois de mai et juin 2018.

¹ https://www.itreetools.org/resources/manuals/Ecov6_ManualsGuides/Ecov6_FieldManual.pdf

ANNEXE II – MÉTHODE D'EXTRAPOLATION DES CARACTÉRISTIQUES ALLOMÉTRIQUES

Pour chaque espèce échantillonnée, nous avons développé des équations allométriques spécifiques à chaque espèce basées sur le DHP afin de prédire i) la hauteur totale de l'arbre, ii) la hauteur au sommet de la cime, iii) la hauteur à la base de la cime et iv) la largeur de celle-ci. Pour chacune de ces mesures, nous avons testé quatre formes allométriques potentielles basées sur les formes de relations établies intégrées dans la base de données i-Tree : linéaire, quadratique, semi-logarithmique et log-log (Figure 13).

Linéaire : $Y = b_0 + b_1 \cdot \text{DBH}$
Quadratique : $Y = b_0 + b_1 \cdot \text{DBH} + b_2 \cdot (\text{DBH}^2)$
Semi-Log : $Y = b_0 + b_1 \cdot \text{Log}(\text{DBH})$
Log-Log : $\text{Log}(Y) = b_0 + b_1 \cdot \text{Log}(\text{DBH})$

Les équations ayant le plus grand pouvoir explicatif (adj-R^2) et ne fournissant pas de valeurs négatives pour les métriques ont été retenues dans l'analyse. Si aucune des équations n'avait un fort pouvoir explicatif et/ou des valeurs $p < 0,05$, les relations allométriques dérivées pour une autre espèce de la même famille ont été appliquées. Dans le cas de la relation pour la hauteur à la base de la couronne, souvent la moyenne était retenue puisque les espèces ne présentaient que peu de variation en fonction de la taille des arbres (par exemple, les espèces de conifères). Les équations allométriques sélectionnées ont ensuite été appliquées à toutes les souches de la même espèce faisant partie de l'inventaire afin d'estimer les paramètres manquants. Pour les mesures du pourcentage de volume manquant dans la canopée, du pourcentage d'exposition morte et lumineuse, des valeurs moyennes ont été calculées et appliquées à toutes les tiges. Pour certaines mesures, où plusieurs mesures de terrain ont été prises, c'est-à-dire la largeur du couvert dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest ainsi que le pourcentage manquant, la moyenne a été estimée et utilisée dans les analyses. Dans quelques cas, les relations allométriques produisaient des résultats non réalistes pour les arbres dans l'inventaire ayant des diamètres plus grands ou plus petits que ceux échantillonnés. Dans ces cas, nous avons appliqué la valeur de la mesure la plus petite ou la plus grande des arbres de l'espèce échantillonnée aux tiges hors de la gamme de DHP mesuré.

Pour les espèces non échantillonnées, des équations des espèces échantillonnées les plus similaires ont été appliquées. Cela a été fait en regroupant d'abord les variétés au sein des espèces et des espèces au sein des genres, de nombreuses caractéristiques structurelles étant fortement conservées au sein des phylogénies, c'est-à-dire dans l'évolution historique des genres ou familles d'espèces. Pour les espèces pour lesquelles il n'existait aucune espèce échantillonnée du même genre ou famille, nous avons appliqué les équations fournies par défaut pour l'espèce dans i-Tree. Pour ces espèces nous avons aussi utilisé les moyennes de l'inventaire pour les variables i) % de la cime manquante, ii) % de la cime morte et iii) nombre de côtés du couvert avec exposition directe à la lumière.

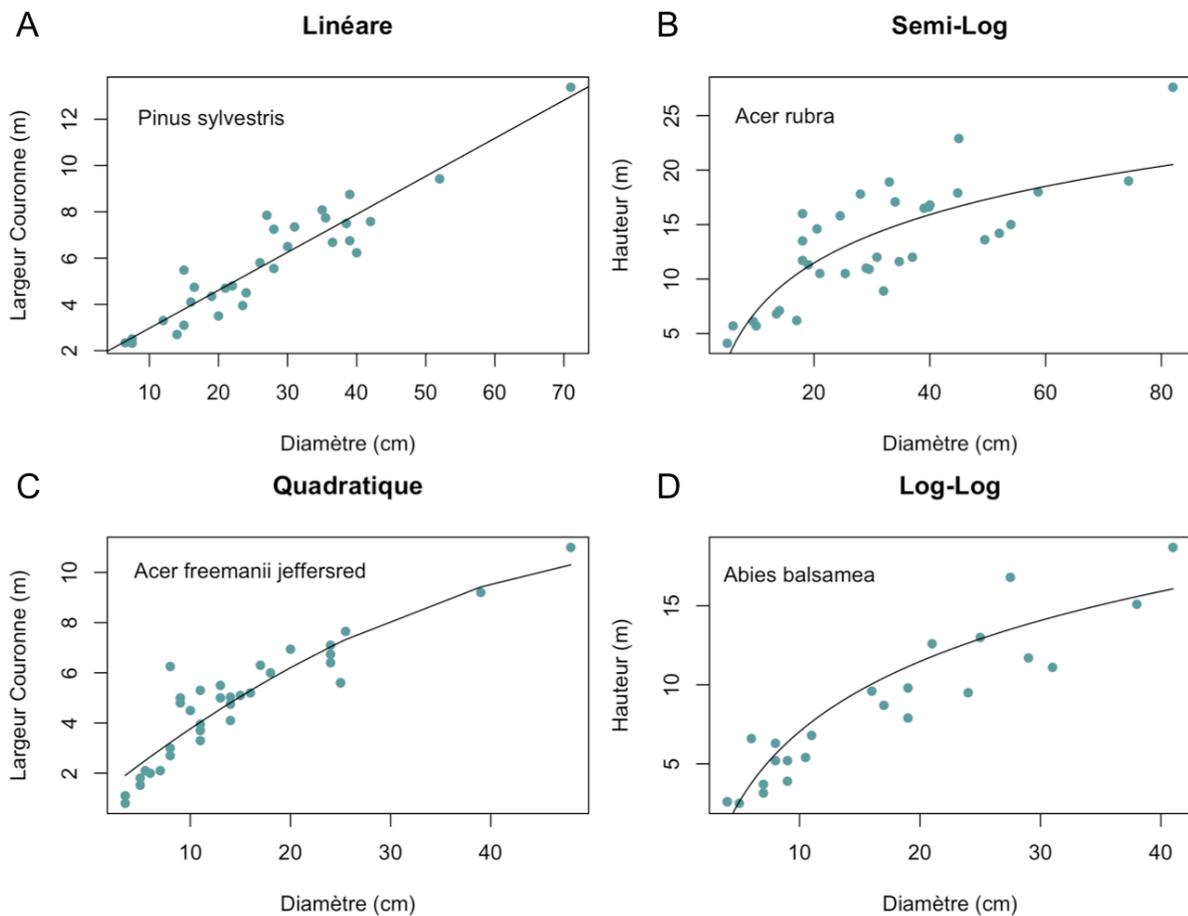


Figure 13 – Exemple des relations allométriques établies entre les mesures de diamètre à hauteur de poitrine et la largeur de la couronne (A, C) et la hauteur totale de l’arbre (B, D) à l’aide des méthodes linéaires (A), semi-log (B), quadratique (C) ou log-log (D)

Deux espèces ont dû être exclues de l’analyse puisqu’il n’était pas possible de les associer à une famille échantillonnée et il n’existait pas d’équation allométrique disponible dans i-Tree. Ces espèces sont *Maackia amurensis* et *Pseudotsuga menziesii*, et comptent respectivement 63 et 7 tiges dans l’inventaire de la Ville.

Les données de l’inventaire sur les arbres municipaux et les variables générées grâce à la campagne d’échantillonnage et des relations allométriques ont été téléchargées dans i-Tree. Les données socioéconomiques et météorologiques ont également été téléversées dans i-Tree. Les données météorologiques proviennent de la station météorologique de l’aéroport international Jean-Lesage du Centre national d’information sur l’environnement pour 2015. Ces données sont les plus récentes disponibles dans le logiciel et couvrent les besoins en intrants météorologiques nécessaires aux analyses. Pour la qualité de l’air, les données de 2010 ont été utilisées, car ce sont les seules données disponibles au Canada pour la qualité de l’air dans i-Tree.

ANNEXE III – MESURES DE DÉRIVATION POUR LE MODÈLE D'ÉNERGIE

Pour calculer la réduction attendue de l'utilisation d'énergie pour chauffer et refroidir les bâtiments résidentiels par les arbres dans i-Tree, il faut disposer de données sur la distance et la direction entre chaque arbre et le bâtiment. Pour générer ces données pour l'inventaire municipaux du Québec, nous avons utilisé l'ensemble de données d'inventaire sous forme de fichier de formes ponctuelles dans ArcGIS en fonction des coordonnées x et y associées, ainsi qu'une couche vectorielle représentant l'empreinte de tous les bâtiments de la ville (Ville de Québec 2017). À l'aide de la fonction "Proche" de la boîte à outils *Spatial Analyst*, nous avons calculé la distance en mètres et la direction en degrés entre chaque arbre et son bâtiment le plus proche.

Dans i-Tree Eco, seuls les arbres situés à moins de 18 m d'un bâtiment et d'une hauteur minimale de 3 m sont susceptibles de créer des ombres sur les bâtiments et d'affecter la consommation d'énergie. Nous incluons uniquement les valeurs calculées de distance et de direction pour les arbres répondant à ces exigences, et nous laissons ce champ vide pour les tiges situées à plus de 18 m de distance ou plus de 3 m de hauteur d'un bâtiment.

ANNEXE IV – DÉRIVATION DE LA VALEUR TOTALE D'UN ARBRE

Pour estimer le flux total de services écosystémiques fournis par un arbre individuel au cours de sa durée de vie estimée, nous traçons la relation spécifique à chaque espèce pour chaque service écosystémique par DHP sur toute la gamme de diamètres de tronc de cette espèce. Nous additionnons ensuite la surface sous la courbe pour estimer le débit total des services écosystémiques à mesure qu'un arbre grandit jusqu'au diamètre maximum enregistré pour la fourniture annuelle de séquestration du carbone, de dépollution, de ruissellement évité (Figure S1.). Pour l'épargne d'énergie, l'emplacement de l'arbre a un fort impacte sur la demande d'énergie résidentiel et peut augmenter ou réduire la demande. Nous estimons la valeur totale pour les deux cas en séparant nos résultats de iTree entre les valeurs d'épargne totale positif et négatif, et estimons la surface sous la courbe pour chaque. Ceci nous donne une estimation de l'épargne totale et aussi le total possible de cout additionnels.

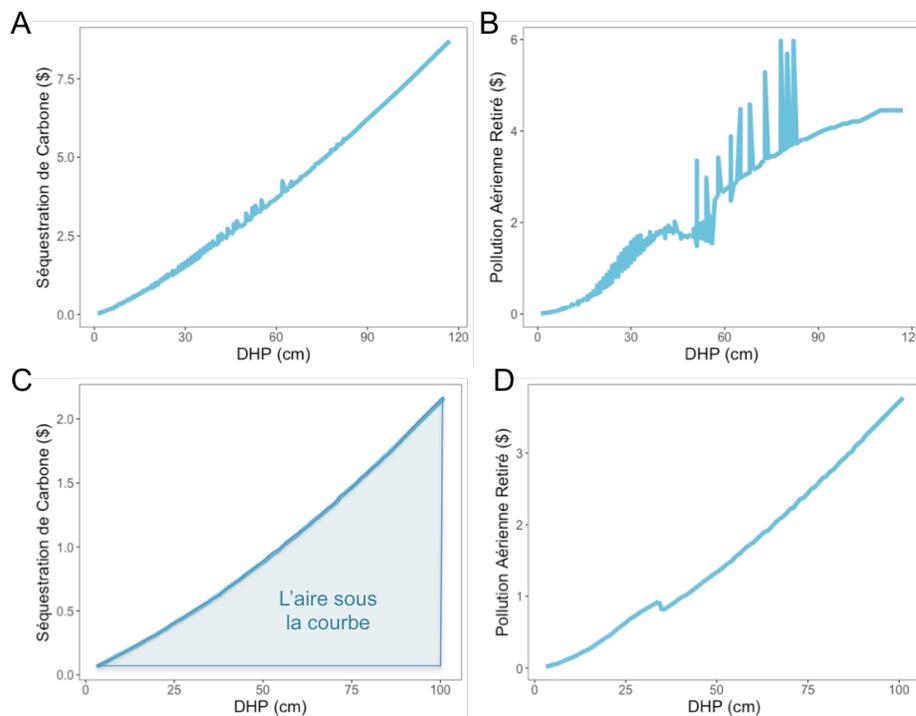


Figure A – Exemple de relations entre les services écosystémiques et le DHP

Cette approche suppose que les arbres poussent en moyenne 1 cm de DHP par an et survivent jusqu'au diamètre maximal, pour lequel les deux hypothèses peuvent ne pas être valables pour tous les arbres. Les arbres urbains ont généralement une durée de vie plus courte que les arbres ruraux car ils ne disposent pas du support structurel d'autres arbres poussant dans des peuplements denses pour résister aux fortes tempêtes et sont souvent abattus pour permettre de nouveaux plans de développement. Nous évaluerons la valeur totale pour les érables de Norvège à 60 cm DHP et les frênes rouges à 70 cm DHP, les tailles moyennes à la fin de vie de ces espèces en ville selon l'information du Département de horticulture et foresterie urbaine de la ville de Québec.

Étant donné que le stockage du carbone et les valeurs structurelles augmentent au fil des années mais ne s'accumulent pas, nous estimons les valeurs maximales de ces services comme étant la valeur estimée par i-Tree du plus gros tronc de chaque espèce de l'inventaire (60cm et 70cm respectivement).

ANNEXE V – CALCUL DE LA VALEUR TOTALE DE LA CANOPÉE URBAINE

Pour estimer la valeur potentielle des services écosystémiques fournis par le couvert forestier urbain total (comprenant les arbres privés, les arbres publics, les bois et les forêts), nous utilisons les résultats des arbres municipaux pour estimer la fourniture de services par hectare. Pour estimer la fourniture de services écosystémiques par hectare, nous avons calculé la superficie de la canopée (m²) de chaque arbre en fonction du DHP et de la largeur de cime modélisée selon l'équation :

$$\text{Superficie} = (\text{Largeur} / 2)^2 * \pi$$

Nous avons ensuite divisé les estimations de la fourniture de services au niveau de la tige par la superficie du couvert forestier afin de générer des estimations de la fourniture de services par m². Enfin, nous avons calculé la valeur moyenne de la fourniture de services par m² sur l'ensemble des tiges de l'inventaire afin de développer une estimation par zone des services fournis par m² et par hectare de couvert forestier. En les synthétisant dans l'ensemble de données d'inventaire, nous estimons que les arbres municipaux couvrent environ 4,98 km² ou 498 ha de la zone urbaine.

À l'aide des fichiers de formes de couvert forestier produits par la Ville de Québec (Ville de Québec, 2015), nous calculons que le couvert forestier total dans le périmètre urbain (Ville de Québec) totalise 75 km² (7 500 ha). Selon cette évaluation, les arbres municipaux de l'inventaire de la Ville de Québec représentent environ 6,7% du couvert forestier urbain complet de la ville.

Nous multiplions les valeurs calculées de services fournis/hectare par les 7500 ha de couvert forestier situés dans le périmètre urbain de la Ville de Québec et les valeurs économiques établies pour chaque service écosystémique. Ces estimations sont approximatives, car elles reposent sur l'hypothèse que les arbres privés et les forêts urbaines ont la même composition en espèces que celle des arbres publics et des formes de croissance similaires. Il est évident que les arbres présents dans les peuplements denses ou les forêts ont des structures de cime moins expansives. Cependant, ces valeurs fournissent une estimation approximative du niveau de service et des avantages dérivés du couvert forestier urbain.

Cette méthode n'était pas appropriée pour estimer la valeur des économies d'énergie, car celle-ci dépendent de données supplémentaires concernant les espèces spécifiques, les formes de croissance et les emplacements des arbres individuels.



550 SHERBROOKE OUEST, TOUR OUEST, 19^e ÉTAGE, MONTRÉAL, QC, CANADA, H3A 1B9 | TÉLÉPHONE 514 282.6464 | TÉLÉCOPIEUR 514 282.7131 | WWW.OURANOS.CA