

Stockage et séquestration de carbone des arbres de la ville de Québec

**Projet de fin d'études présenté à la Faculté de
Foresterie, Géographie et de Géomatique**

Dépôt initial

Travail présenté au Département de foresterie

Dans le cadre du cours

FOR-3700 : Projet de fin d'études

Par

Pierre Roucoules

Québec, le 07 novembre 2022

Remerciements :

Pour commencer, je tiens à remercier particulièrement Janani Sivarajah, mon directeur de projet, qui a su dans un premier temps m'aiguiller et me conseiller dans le choix de mon projet d'étude en me proposant divers sujets. Par la suite, elle a su me diriger dans la bonne direction, me prodiguer des conseils pertinents qui m'ont fait gagner du temps pour la réalisation de ce projet.

Résumé :

Ce projet s'inscrit dans un contexte de changements climatiques où les pays et villes cherchent des solutions afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre ou les séquestrer. Les villes ont cet avantage de posséder des forêts urbaines qui, naturellement, séquestrent le carbone présent dans l'atmosphère via la photosynthèse pour croître. Estimer cette quantité de carbone devient alors utile pour les villes afin d'utiliser cette valeur dans leur plan d'atténuation contre els changements climatiques mais aussi pour obtenir de crédits compensatoires sur le marché du carbone. Dans ce projet, le logiciel i-Tree est utilisé car il est reconnu pour sa pertinence et utilisé dans de nombreuses études que ce soit aux États-Unis ou en Ontario. La simulation a montré que 44 721 tonnes de carbone sont actuellement stockées dans les 134 199 arbres utilisé pour l'étude et que 834 nouvelles tonnes sont séquestrées annuellement. Le quartier de Saint-Sacrement est celui qui stocke et séquestre le plus de carbone à l'hectare. Ces résultats montrent que la forêt urbaine de la ville de Québec séquestre 3058 tonnes d'équivalent CO₂ par an et la ville pourrait obtenir autant de crédits compensatoire qui lui permettrait d'obtenir un budget supplémentaire à des fins d'entretien et de plantation pour améliorer la superficie et qualité de la canopée forestière.

Table des matières :

Remerciements :	i
Résumé :	i
Liste des figures :	iii
Liste des tableaux :	iv
Introduction :	1
Chapitre 1	4
Méthodologie	4
Chapitre 2	8
Résultats obtenus et interprétations	8
2.1 Présentation et traitement des données	8
2.2 Résultats :	12
2.2.1. Résultats par espèces	12
2.2.2. Résultats par quartier	15
2.2.3. Résultats par superficie	16
2.2.4. Comparaison avec d'autres forêts urbaines	18
Chapitre 3	20
Discussion	20
3.1. Avantages	20
3.2 Limitations	20
3.2.1. Données d'inventaire	20
3.2.2. Superficie quartiers	22
3.3. Possibilités	23
3.3.1. Analyse individuelle	23
3.3.2. Atténuation des changements climatiques	23
Conclusion	25
Références	26
Annexes	28

Liste des figures :

Figure 1 : Flow chart décrivant le processus de nettoyage de la base de données.....	9
Figure 2 : Répartition des arbres en classe de 10 cm de DHP	11
Figure 3 : Distribution des 20 espèces ou genre les plus abondants dans la base de données .	11
Figure 4 : Représentation des 10 genres d'arbres les plus présents à Québec	12
Figure 5 : Représentation des 10 espèces séquestrant le plus de carbone.....	13
Figure 6 : Représentation des 10 espèces stockant le plus de carbone	13
Figure 7 : Répartition en classe de DHP de <i>Acer platanoides</i> et <i>Acer saccharinum</i>	14
Figure 8 : Séquestration annuelle de carbone par quartier	15
Figure 9 : Stockage de carbone par quartier.....	16
Figure 10 : Séquestration annuelle de carbone par hectare pour chaque quartier.....	17
Figure 11 : Stockage de carbone par ha pour chaque quartier	17
Figure 12 : Représentation cartographique de la séquestration annuelle par hectare	18

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Résultats de modélisations de l'étude de 475 arbres de Bolzano.....	7
Tableau 2 : Répartition du nombre d'arbres par quartier dans la ville de Québec.....	10
Tableau 3 : Comparaison des 5 quartiers séquestrant et stockant le plus de carbone	15
Tableau 4 : Comparaison des quartiers séquestrant et stockant le plus de carbone à l'hectare	16
Tableau 5 : Comparaison des données d'i-Tree d'autres villes	19
Tableau 6 : Stockage et séquestration annuelle par espèces	28
Tableau 7 : Stockage et séquestration annuelle par quartier	32
Tableau 8 : Stockage et séquestration annuelle par superficie pour chaque quartier.....	33

Introduction :

Les arbres urbains ont de nombreux bienfaits, ces avantages, appelés services écosystémiques peuvent être physique comme la création d'habitats pour la faune et leurs contributions à la biodiversité ou plus difficile à quantifier, comme le bien-être qu'ils apportent. Leurs effets sur la santé mentale est connu, apportant bonheur, réduisant le stress, la dépression ou favorisant même les résultats scolaires (Nowak & al, 2014). La canopée présente dans les villes apporte de l'ombre ce qui permet de refroidir la température en dessous celle-ci, augmentant le confort des rues urbaines, de plus elle améliore aussi la qualité de l'air (Nowak & al, 2014). Par la même occasion ils permettent de réduire la consommation énergétique des bâtiments résidentiels, car leurs ombres portent aussi sur les bâtiments, et les cimes bloquent le vent (Lessard & Boulfroy, 2008). Au fur et à mesure qu'un arbre grandit, il emmagasine plus de carbone en l'accumulant dans son tissu. Cela se fait au travers de la séquestration de carbone provenant de la photosynthèse, ainsi les arbres participent à atténuer les changements climatiques, et cette capacité peut être considérée dans le cadre d'un projet visant à obtenir des crédits compensatoires. Le stockage et la séquestration du carbone sont donc considérés comme l'un des plus importants avantages physiques fournis par les arbres.

De plus, de nos jours les changements climatiques sont une certitude. Grâce entre autres au travail du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), les impacts de ces derniers ont été mis en avant, et une prise de conscience générale a débuté (IPCC, 2022). De leur côté, les villes et gouvernements se doivent de minimiser leurs impacts d'émission et de mettre en place des actions et mesures afin de les atténuer (Ouranos, 2010). Pour cela, des plans de lutte contre les changements climatiques sont mis en place où l'on décrit la vision qu'ont les pays et villes pour y faire face. Dans ce contexte, la séquestration de carbone a une part très importante pour faire face à ces changements, et permet aussi l'attribution de crédits carbone. Ainsi, il est nécessaire pour les villes d'être capable de savoir combien les arbres urbains stockent et séquestrent de carbone.

La majorité des études produites sur le sujet nous proviennent des États-Unis. Leurs études ont permis de déterminer des équations allométriques pour les arbres urbains (Smith & al, 2006 et Nowak, 2021). Cette méthodologie utilise la base de données des

inventaires urbains afin d'y parvenir. Grâce aux mesures d'essences et de diamètre, des équations allométriques permettent de relier la biomasse produite au diamètre et donc, du carbone séquestré. Il existe peu d'informations sur la façon dont les taux de piégeage du carbone varient entre des arbres d'espèces différentes et cultivées dans des conditions différentes.

Cependant, le logiciel i-Tree Eco développé par le U.S.D.A Forester Service présente de nombreux avantages. Le logiciel peut calculer la séquestration et le stockage de carbone d'un arbre en fonction de son espèce et de son diamètre, tout en prenant en compte des données météorologiques provenant directement, pour ce projet, de la station météorologique de l'aéroport de Val-Cartier. Contrairement à d'autres logiciels qui nécessitent absolument la hauteur de l'arbre ou de la structure de sa cime pour ses calculs, i-Tree ne demande ces données uniquement pour affiner la précision des résultats. C'est pour ces raisons que le choix du logiciel s'est porté sur i-Tree pour cette étude. De plus, plusieurs villes nord-américaines ont déjà fait l'objet d'études par ce logiciel et les résultats sont rendus disponibles, comme pour celle de la ville de Toronto (City of Toronto, 2017).

La ville de Québec ayant compris l'importance des enjeux entourant les services écosystémiques des arbres urbains a commandé, en 2018 par Ouranos, une étude portant sur leur valeur économique. Cette étude montre l'importance des arbres urbains dans un contexte de changements climatiques et que les arbres urbains séquestraient, à cette époque, 650 nouvelles tonnes de carbone chaque année ce qui contribue à réduire les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et à compenser les émissions de d'autres activités (Wood & al., 2018).

Ainsi, les arbres urbains ont un réel impact sur les changements climatiques via leur capacité à séquestrer le carbone et les villes peuvent utiliser cette capacité dans leur plan de gestion au travers des crédits carbone. La ville de Laval a par exemple acheté 87 000 crédits carbone récemment afin de planter 250 000 arbres dans la grande région métropolitaine (Boyer & al., 2020). De cette façon une entreprise ou la ville elle-même peut utiliser la capacité de séquestration de carbone des arbres afin de compenser une réduction d'émission de gaz à effets de serre qui n'a pas eu lieu. De plus, il est important de prendre en compte que les villes s'étalent de plus en plus, ainsi l'importance des forêts urbaine va aller en grandissant avec le temps. Les arbres urbains auront alors un rôle

important grâce aux services écosystémiques qu'ils apportent mais aussi leur capacité à séquestrer le carbone.

Ce projet a pour but de comprendre le phénomène de séquestration de carbone ainsi que la méthodologie de calcul qui lui est associé afin de l'appliquer à la base de données des arbres urbains de la ville de Québec. Ce processus permettra une estimation de la séquestration annuelle ainsi que le stockage total des arbres de la ville de Québec et les bénéfices que cela peut rapporter à la ville dans un contexte de changements climatiques.

Chapitre 1

Méthodologie

Le stockage du carbone correspond à la quantité de carbone liée dans les parties aériennes et souterraines de la végétation ligneuse, donc le bois situé dans les racines, le tronc et les branches. La séquestration du carbone est l'élimination du dioxyde de carbone de l'air par les plantes lors du processus de photosynthèse.

Les modèles utilisés pour calculer ces deux valeurs utilisent des équations dites allométriques qui permet de prédire une estimation d'une mensuration, ici sa biomasse en fonction d'une autre mensuration, son diamètre par exemple (Picard & al, 2012). Pour les déterminer et les vérifier, une méthode empirique est utilisée en pesant un arbre étudié et en faisant le rapport avec sa densité. Pour calculer le stockage actuel de carbone, la biomasse de chaque arbre a été calculée à l'aide d'équations tirées de la littérature et de données mesurées sur les arbres.

Une équation allométrique basique est la relation entre la biomasse « B » et le diamètre « D », où un coefficient d'allométrie « a » s'ajoute qui correspond à la proportionnalité des accroissements au sein de l'arbre. Un second paramètre « b » correspond à la proportionnalité des grandeurs cumulées et enfin, on y rajoute généralement une valeur « c » en ordonnée qui correspond à la biomasse de l'individu avant qu'il n'atteigne la hauteur à laquelle le diamètre est mesuré (Picard & al, 2012).

$$B = c + bD^a$$

L'ajout d'autres données que le diamètre en entrée, comme la hauteur de l'arbre par exemple permet d'augmenter la précision de l'estimation et affine donc le modèle.

Pour estimer la quantité brute de carbone séquestrée annuellement, il faut estimer la quantité de carbone assimilé à la biomasse pendant une durée d'un an de croissance (Russo & al, 2014). Pour cela, il faut estimer la croissance moyenne de l'arbre, en fonction de son espèce et son diamètre. Grâce à cela, une seconde valeur de stockage est calculée correspondant au diamètre que l'arbre aura l'année suivante.

$$B_{x+1} = c + bD_{x+1}^a$$

Ainsi la séquestration annuelle de carbone d'un arbre correspond à la différence de carbone stocké entre sa biomasse à l'année x et celle calculée à l'année $x+1$ avec une croissance diamétrale estimée (Russo & al, 2014). Cependant la séquestration est aussi influencée par les caractéristiques de mortalités, qui elles sont influencées par l'utilisation du site où est planté l'arbre, les perturbations naturelles et celles anthropiques, ou encore l'entretien qui est prodigué aux arbres (Russo & al, 2014).

Les équations allométriques utilisées par le logiciel i-Tree sont basés sur des études qui proviennent de villes américaines, ce qui est un avantage pour une utilisation du modèle au Québec, car certaines villes du nord des États-Unis possèdent des caractéristiques climatiques similaires au Québec (Russo & al, 2014). De plus, le modèle permet d'intégrer des constantes météorologiques provenant de la station de l'aéroport de Val-Cartier. Ainsi on obtient de meilleures estimations de la croissance annuelle des arbres pour le calcul de séquestration grâce au nombre de jours de croissance à la ville de Québec.

Le modèle d'i-Tree prend aussi en compte que les arbres cultivés à l'air libre et entretenus ont tendance à avoir moins de biomasses que prévu par les équations de biomasse dérivées de la forêt (McPherson & al, 1994). Pour ajuster cette différence, les résultats de la biomasse pour les arbres urbains en plein air ont été multipliés par 0,8. La biomasse en poids sec des arbres a été convertie en carbone stocké en multipliant par 0,5. Ces deux facteurs sont intégrés directement dans le logiciel i-Tree (Russo & al, 2014).

Le taux de croissance annuelle utilisé est celui d'arbre présent dans une structure assimilable à celle d'un parc, soit de 0,61 cm/an (Nowak & al., 2002). Cette valeur-là est ensuite ajustée en fonction de l'état de l'arbre et les facteurs qui conditionnent cet état sont le pourcentage de dépérissement de la cime. Les ajustements sont de 100% pour un arbre en excellente santé, de 76% pour un arbre dépérissant, de 42% pour un arbre mourant et enfin, évidemment, de 0% pour un arbre mort (Russo & al, 2014).

Une étude portant sur les arbres urbains de la ville de Bolzano en Italie a comparé les estimations de stockage et de séquestration de différents modèles, dont i-Tree et un autre modèle nommé CTCC (Russo & al, 2014). Le tableau 1 montre les résultats entre ces deux modèles et leurs équations allométriques pour un calcul portant sur 475 arbres. Les résultats démontrent une séquestration similaire, mais un stockage sous-estimé d'environ 15% par le modèle i-Tree (Russo & al, 2014).

	Séquestration en tonne/an	Stockage en tonne
Équations allométriques de références	5,73	179,14
Modèle CTCC	8,27	140,15
Modèle i-Tree	5,82	134,89

Tableau 1 : Résultats de modélisations de l'étude de 475 arbres de Bolzano

Cependant, cette étude a été réalisée avec une ancienne version de i-Tree et donc, certains des inconvénients identifiés dans l'étude ont pu être corrigés avec un modèle bonifié.

Enfin, i-Tree met à disposition les résultats de modélisations concernant 26 villes, principalement situées aux États-Unis, mais aussi des villes canadiennes et plus précisément ontariennes, comme Toronto, London ou Oakville, villes qui pourraient plus s'assimiler aux conditions de modélisations québécoises (Toronto city, 2017).

Chapitre 2

Résultats obtenus et interprétations

2.1 Présentation et traitement des données

Les données utilisées pour ce travail proviennent de l'inventaire urbain des arbres de la ville de Québec. Cette base de données, mise à disposition par la ville de Québec, a été élaborée et mise à jour depuis 2012 (Gouvernement du Québec, 2022). Grâce à l'utilisation du logiciel ArcGIS, une autre donnée a pu être rajoutée à celles déjà acquises lors de l'inventaire, la localisation de chaque arbre dans un des 35 quartiers de la ville de Québec. La cartographie des quartiers de la ville de Québec a été utilisée, à laquelle j'ai rajouté la ville de L'Ancienne-Lorette, absente des données, et où de nombreux arbres et arbustes ont été inventoriés. Il est important de présenter qu'une grande quantité d'arbres privés sont présents et non pas été inventoriés (Ville de Québec, 2008).

Le jeu de donnée présente plusieurs informations essentielles à ce travail. Le nom scientifique de chaque arbre, leur diamètre ainsi que la hauteur à laquelle celui-ci a été pris sont indispensables pour les calculs qui suivront dans ce projet. On peut tout de suite noter l'absence dans cette base de données de certaines mesures qui auraient été très pertinentes comme la hauteur de l'arbre ou la taille et la santé de la cime.

Initialement la base de données comporte 134 327 arbres, cependant elle présente certaines données incomplètes ou qui seront inutilisables dans nos modèles ou encore tout simplement incohérentes. Le tableau 1 décrit les différents critères utilisés afin de rendre la base de données parfaitement utilisable par le logiciel i-Tree. Les données manquantes sont tout simplement supprimées alors que les cultivars sont traités différemment. En effet, le logiciel i-Tree reconnaît dans sa version actuelle une faible proportion de cultivars, ou bien de variétés d'arbres. Ainsi, ceux non reconnus sont remplacés par l'espèce ou le genre le plus proche. Par exemple, *Picea pungens* 'Glauca' est renommé *Picea pungens* et *Ulmus* 'Patriot' est renommé seulement *Ulmus*.

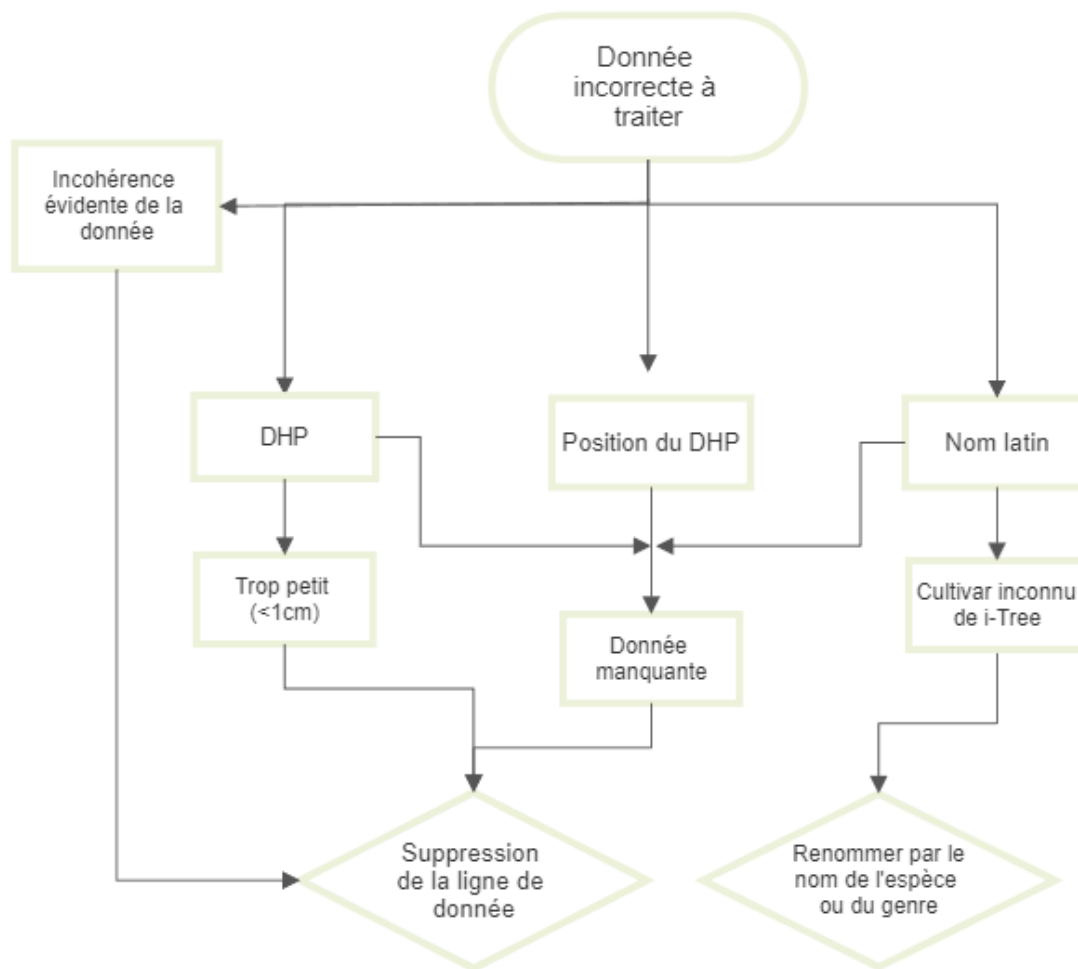


Figure 1 : Flow chart décrivant le processus de nettoyage de la base de données

Ainsi après nettoyage, c’est 134 199 arbres qui pourront être utilisés dans nos calculs. La base de données provenant des différents inventaires urbains effectués fournit comme seule location, en plus de la géolocalisation de la donnée, le nom de la rue ou du parc où est prise la donnée. Pour notre étude il est important d’associer un quartier à chaque arbre afin de pouvoir analyser les résultats de façon géographique. Une intersection géographique a été faite avec le logiciel ArcGIS afin de faire cette association, le tableau 2 montre la répartition des arbres par quartier dans la ville de Québec.

Quartier	Nombre d'arbres	Superficie en ha
Neufchâtel Est-Lebourgneuf	13446	2298,60
Duberge-Les Saules	11935	1941,88
Maizerets	6868	461,18
Sillery	5832	757,94
Cap-Rouge	5517	1272,10

Lairet	5075	313,61
Des Châtel	4657	92,06
Saint-Sacrement	4577	170,46
Vanier	4376	625,57
Saint-Sauveur	4295	396,52
Vieux-Limoilou	4271	243,69
Val-Bélair	4244	7441,12
L'Aéroport	4219	5464,23
Pointe-de-Sainte-Foy	3865	428,06
Saint-Roch	3592	153,36
Saint-Louis	3402	601,48
Cité Universitaire	3340	795,43
Loretteville	3134	2025,07
Vieux-Québec Cap-Blanc Colline Parlementaire	2980	429,43
Jésuites	2924	482,34
Saint-Michel	2877	917,92
Montcalm	2631	175,02
Saint-Émile	2570	1051,28
Vieux-Moulin	2534	924,93
Trait-Carré	2508	360,98
Orsainville	2389	763,33
Vieux-Bourg	2061	669,73
Plateau	2051	355,92
Chutes-Montmorency	1938	908,61
Notre-Dame-des-Laurentides	1852	3623,95
Bourg-Royal	1848	1148,92
Saint-Rodrigues	1843	269,40
Laurentides	1464	4470,23
Saint-Jean-Baptiste	1439	67,96
Lac-Saint-Charles	981	3850,12
L'Ancienne-Lorette	664	770,34
Total	134199	47541,66

Tableau 2 : Répartition du nombre d'arbres par quartier dans la ville de Québec

Le diamètre de l'arbre est la donnée la plus importante avec l'espèce de l'arbre, car c'est elle qui module la quantité de carbone stockée et séquestrée. Une analyse quantile des diamètres des arbres de la ville effectuée avec le logiciel ArcGIS montre qu'il y a autant d'arbres mesurés de 0 à 10cm de DHP, que de 11 à 22, 23 à 36 et 37 à 210. Ainsi, 50% des arbres de la ville ont moins de 22 cm de DHP, et 25 % ont plus de 37 cm. La figure 2 montre une répartition des DHP par classe de 10, seuls les arbres de plus de 100 cm de DHP sont regroupés ensemble pour plus de clarté.

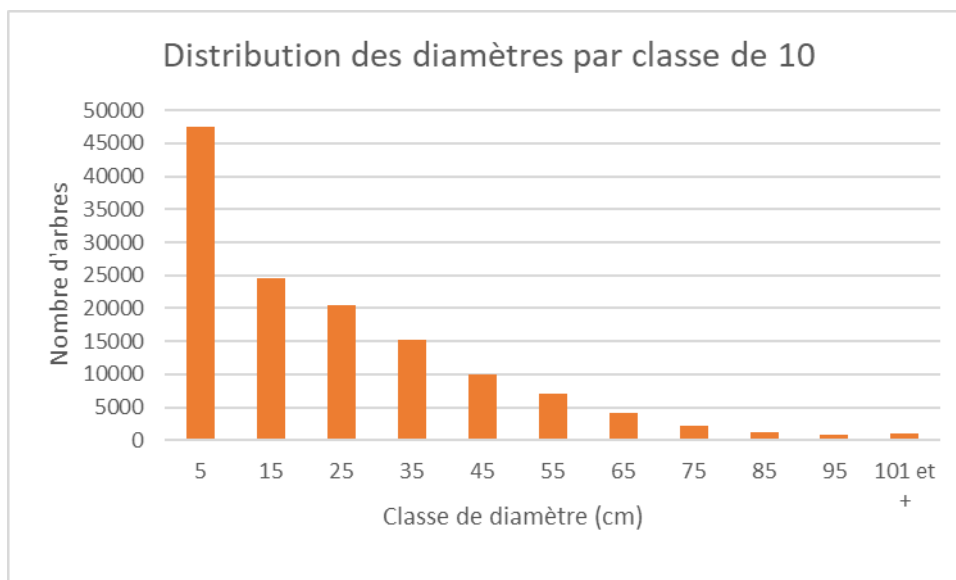


Figure 2 : Répartition des arbres en classe de 10 cm de DHP

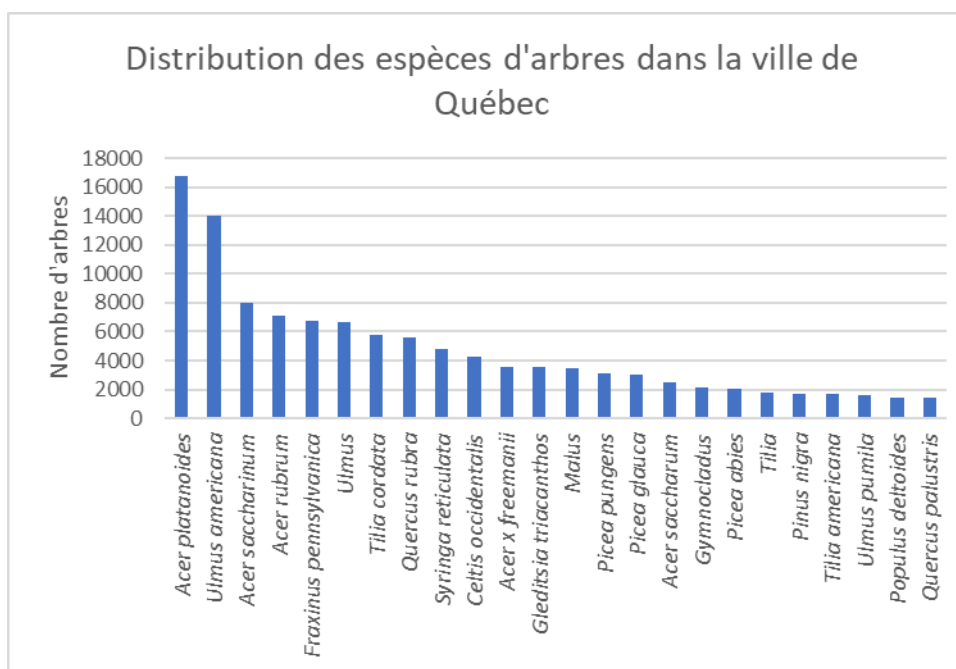


Figure 3 : Distribution des 20 espèces ou genre les plus abondants dans la base de données

La figure 3 présente les 20 espèces représentant pour au moins 1% des arbres de la ville de Québec, ces 20 espèces composent pour 84% des arbres de la ville et les 168 espèces d'arbres différentes. Malgré une grande diversité des espèces, 47% des arbres municipaux de la ville sont représentés par le genre *Acer* ou *Ulmus*. La figure 4 montre que les 10 genres les plus représentés constituent environ 87% des arbres de la ville et que 6 d'entre eux composent 75% des arbres inventoriés.

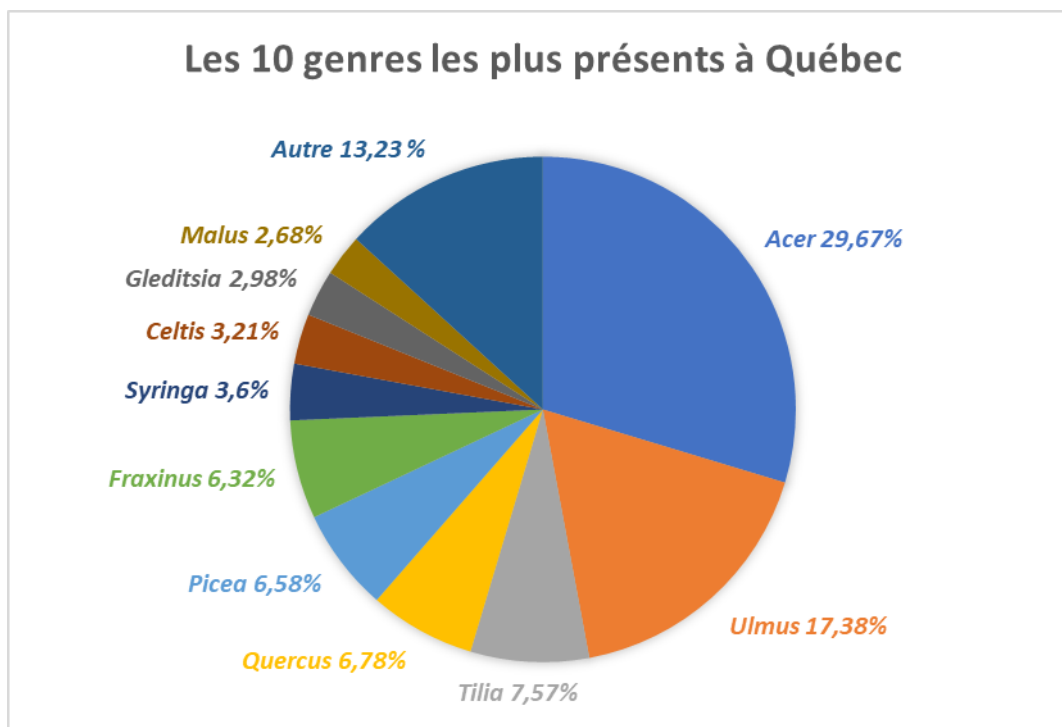


Figure 4 : Représentation des 10 genres d’arbres les plus présents à Québec

2.2 Résultats :

Le logiciel i-Tree fournit deux données tout aussi pertinentes l’une que l’autre pour ce projet soit la séquestration annuelle de carbone et le stockage total de chaque arbre. Les arbres réduisent la quantité de carbone dans l’air en la séquestrant dans la croissance annuelle, et cette valeur augmente en fonction de la taille et de la santé de chaque arbre. La quantité annuelle séquestrée dans la ville de Québec est de 834 tonnes de carbone. Le stockage lui, augmente au fur et à mesure que l’arbre grandit et le carbone emmagasiné est accumulé dans son tissu. Ainsi ces deux données vont être présentées pour chacune des sous-parties, et les résultats complets obtenus sont disponibles en annexe.

2.2.1. Résultats par espèces

Comme vu précédemment dans la section présentation des données, les trois espèces les plus présentes sont *Acer platanoides*, *Ulmus americana* et *Acer saccharinum*. Pour les 10 espèces séquestrant annuellement le plus de carbone, ou celles en ayant le plus stocké, nous retrouvons 8 espèces identiques, comme on peut le faire avec les figures 4 et 5.

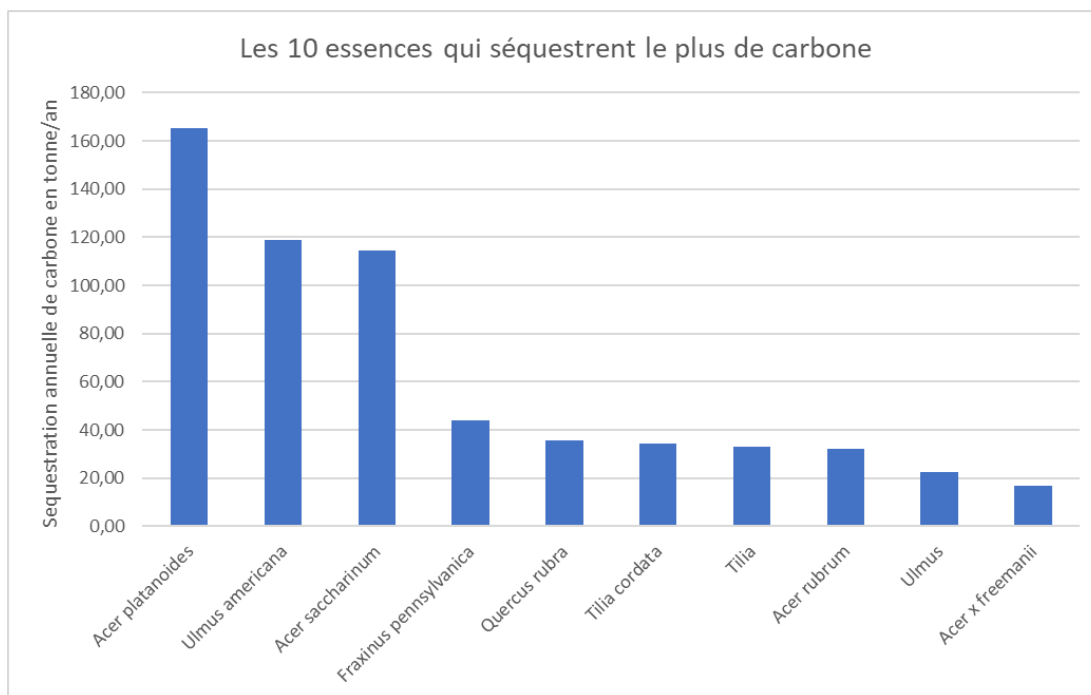


Figure 5 : Représentation des 10 espèces séquestrant le plus de carbone

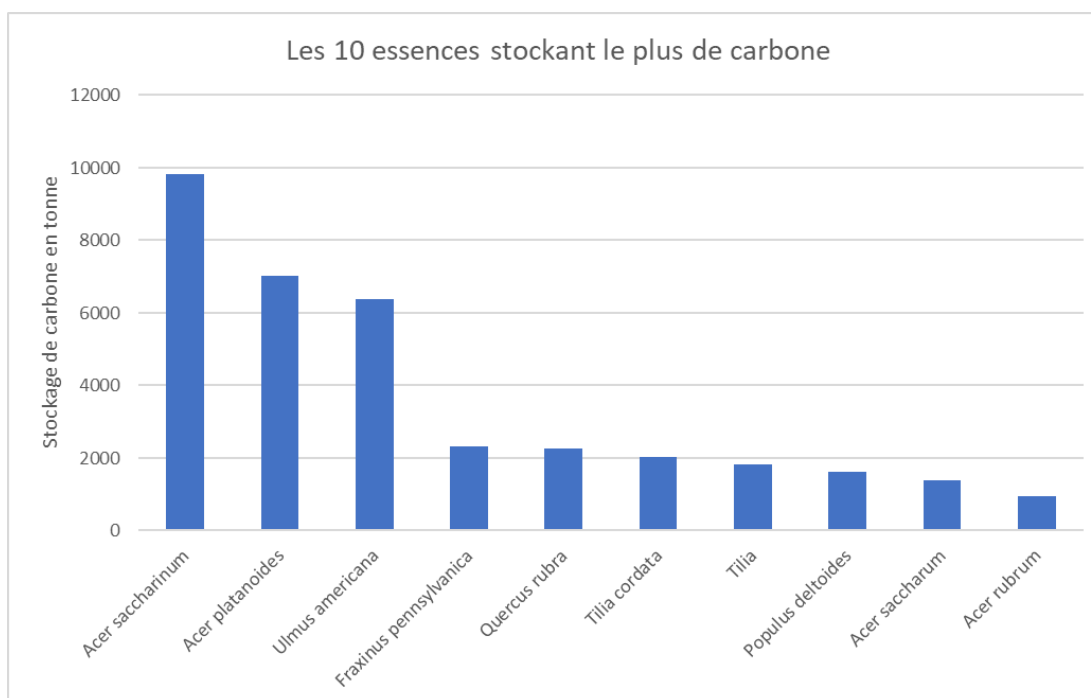


Figure 6 : Représentation des 10 espèces stockant le plus de carbone

Cependant, alors que l'ordre des 3 essences les plus présentes correspond à l'ordre de celle séquestrant le plus, ce n'est pas le cas pour le stockage, avec *Acer saccharinum* qui obtient la première place.

C'est en observant la répartition du nombre d'arbres pour chaque classe de DHP que l'on peut comprendre cette différence. Comme vu lors de la première section de ce rapport, plus un arbre est gros, plus il a pu accumuler de carbone durant sa vie. Ainsi, bien que 2 fois moins nombreux, *Acer saccharinum* a pu plus stocker de carbone grâce à un DHP moyen de 54 cm contre 30 cm pour *Acer platanoides*. Étant une essence indigène, les érables argentés sont plus vieux et donc plus gros que les érables de Norvège plus récemment plantés.

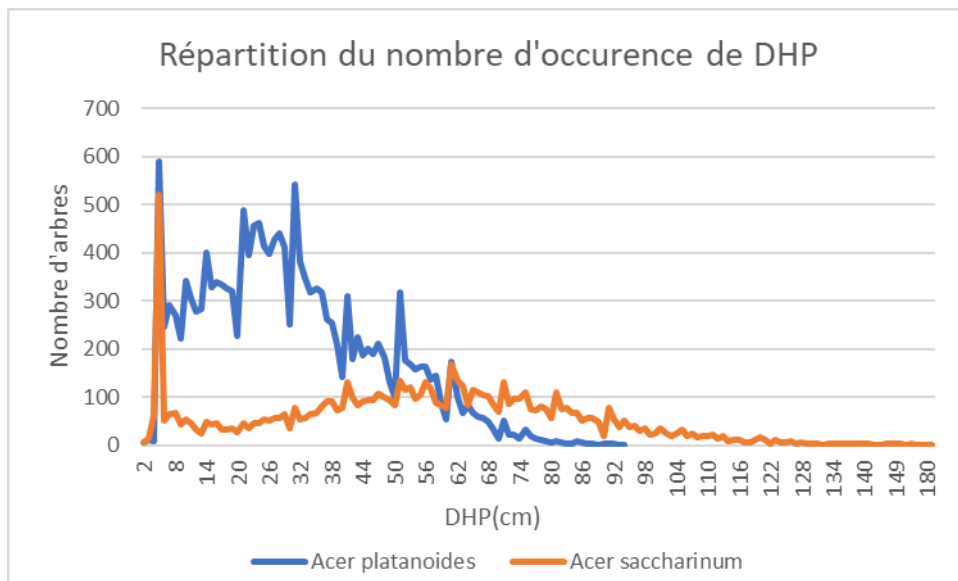


Figure 7 : Répartition en classe de DHP de *Acer platanoides* et *Acer saccharinum*

Les 10 arbres présentés à la figure 4 séquestrent annuellement 618 tonnes de carbone, soit 74,13% des 834 tonnes/an séquestré à Québec. Les 10 arbres de la figure 5 stockent actuellement 32 617 tonnes de carbone, soit 72,92% des 44 727 stockés dans les arbres urbains de la ville de Québec.

2.2.2. Résultats par quartier

Les données de séquestration ou de stockage par quartier nous présentent dans les figures 7 et 8 une répartition assez similaire. En effet on retrouve par exemple les mêmes 5 quartiers dans ceux qui séquestrent ou stockent le plus de carbone et ce sont, hormis pour Cap-Rouge, les 5 ayant le plus d'arbres. Ainsi ces 5 quartiers regroupent 32,16% des arbres urbains de la ville, séquestrent annuellement 37,13% du carbone et stockent 39,13% du carbone des arbres de Québec.

Quartier	Nombre d'arbres		Séquestration annuelle de carbone en tonne/an		Stockage de carbone en tonne	
	Nombre	Pourcentage	Quantité	Pourcentage	Quantité	Pourcentage
Neufchâtel Est-Lebourgneuf	13446	10,02%	55,56	6,66%	3902,6	8,73%
Duburger-Les-Saules	11935	8,89%	101,35	12,15%	5796,9	12,96%
Maizerets	6868	5,12%	43,2	5,18%	2531,3	5,66%
Sillery	5832	4,35%	68,61	8,23%	2790,9	6,24%
Lairet	5075	3,78%	40,94	4,91%	2480	5,54%
Aire d'étude	134199	100%	834,01	100%	44727,1	100%

Tableau 3 : Comparaison des 5 quartiers séquestrant et stockant le plus de carbone

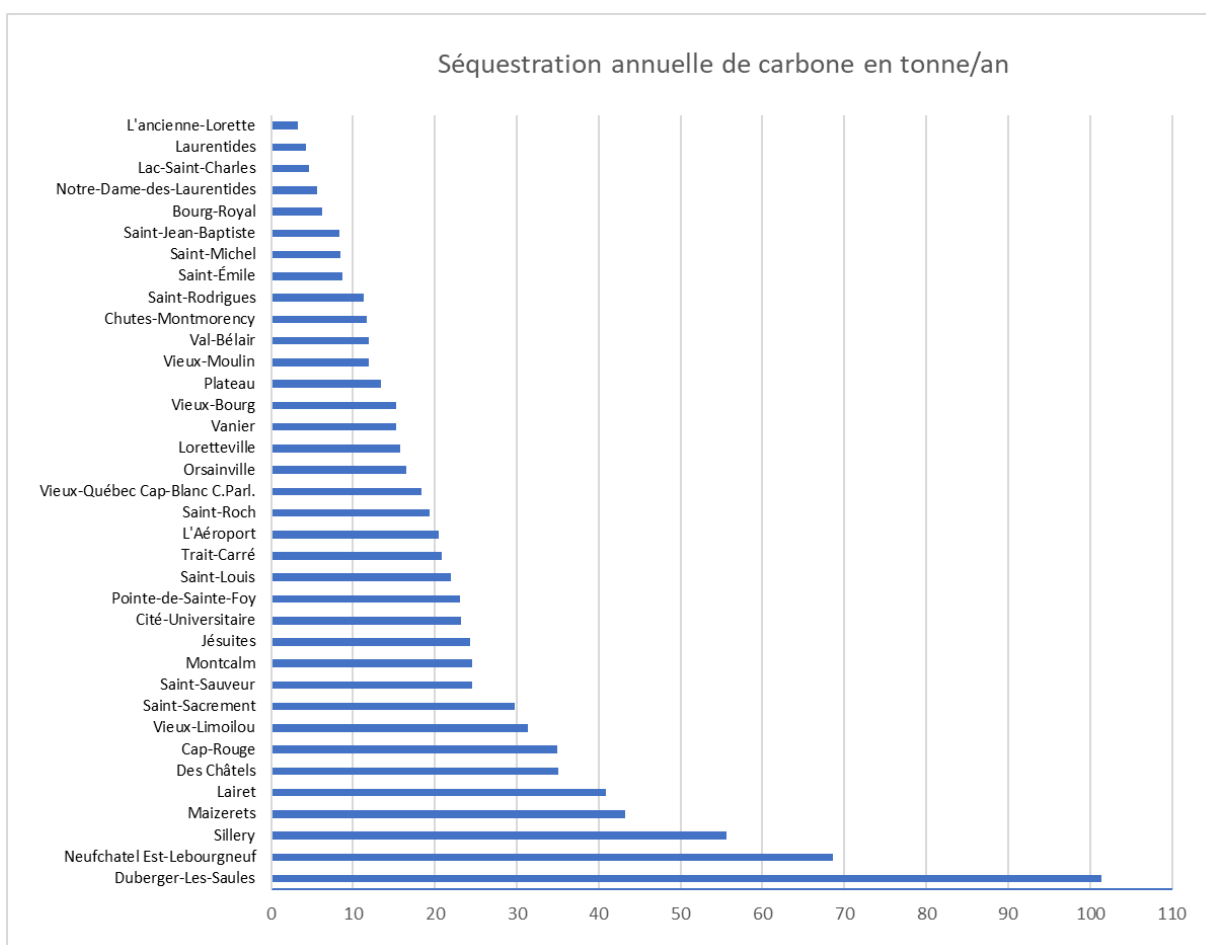


Figure 8 : Séquestration annuelle de carbone par quartier

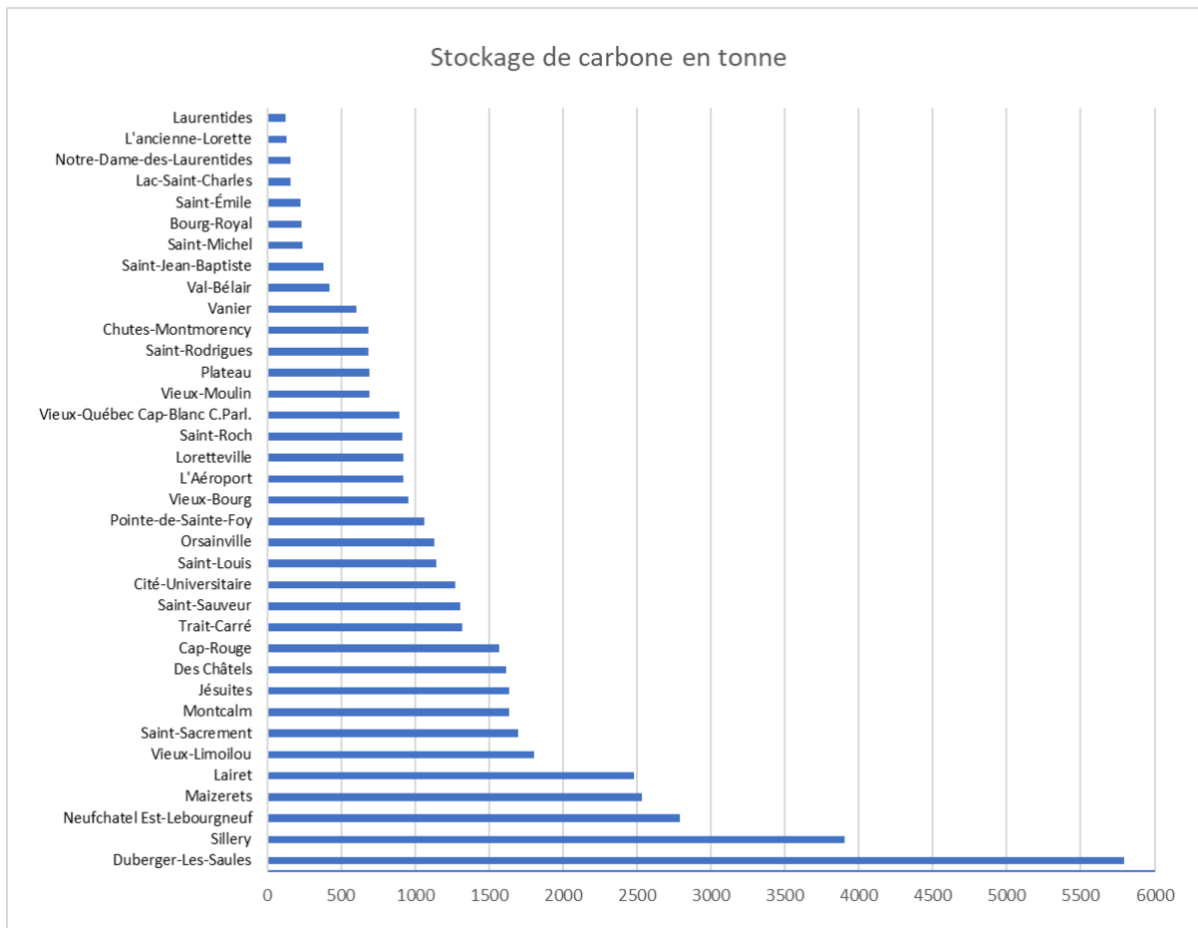


Figure 9 : Stockage de carbone par quartier

2.2.3. Résultats par superficie

Enfin, il est très pertinent de convertir ces données en densité de séquestration ou de stockage en utilisant la superficie de chacun des quartiers. Rapporier en tonne/ha/an ou en tonne/ha, il est beaucoup plus facile et intéressant de comparer les quartiers de cette façon.

Quartier	Séquestration de carbone en kg/an/ha	Stockage de carbone kg/ha
Saint-Sacrement	175,05	9964,8
Montcalm	140,12	9350,9
Lairet	130,37	7898,2
Vieux-Limoilou	128,55	7400,2
Saint-Roch	126,68	5974,6
Aire d'étude	17,54	940,90

Tableau 4 : Comparaison des quartiers séquestrant et stockant le plus de carbone à l'hectare

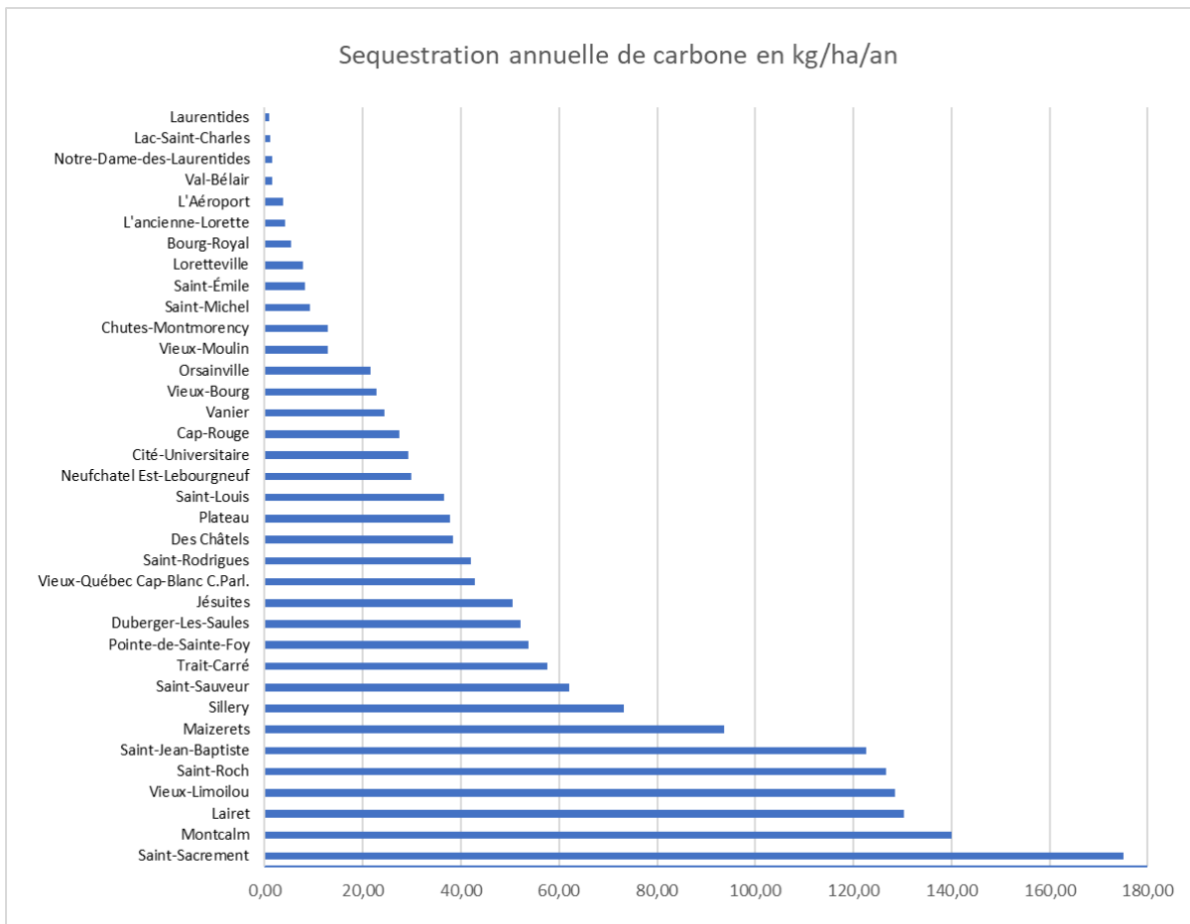


Figure 10 : Séquestration annuelle de carbone par hectare pour chaque quartier

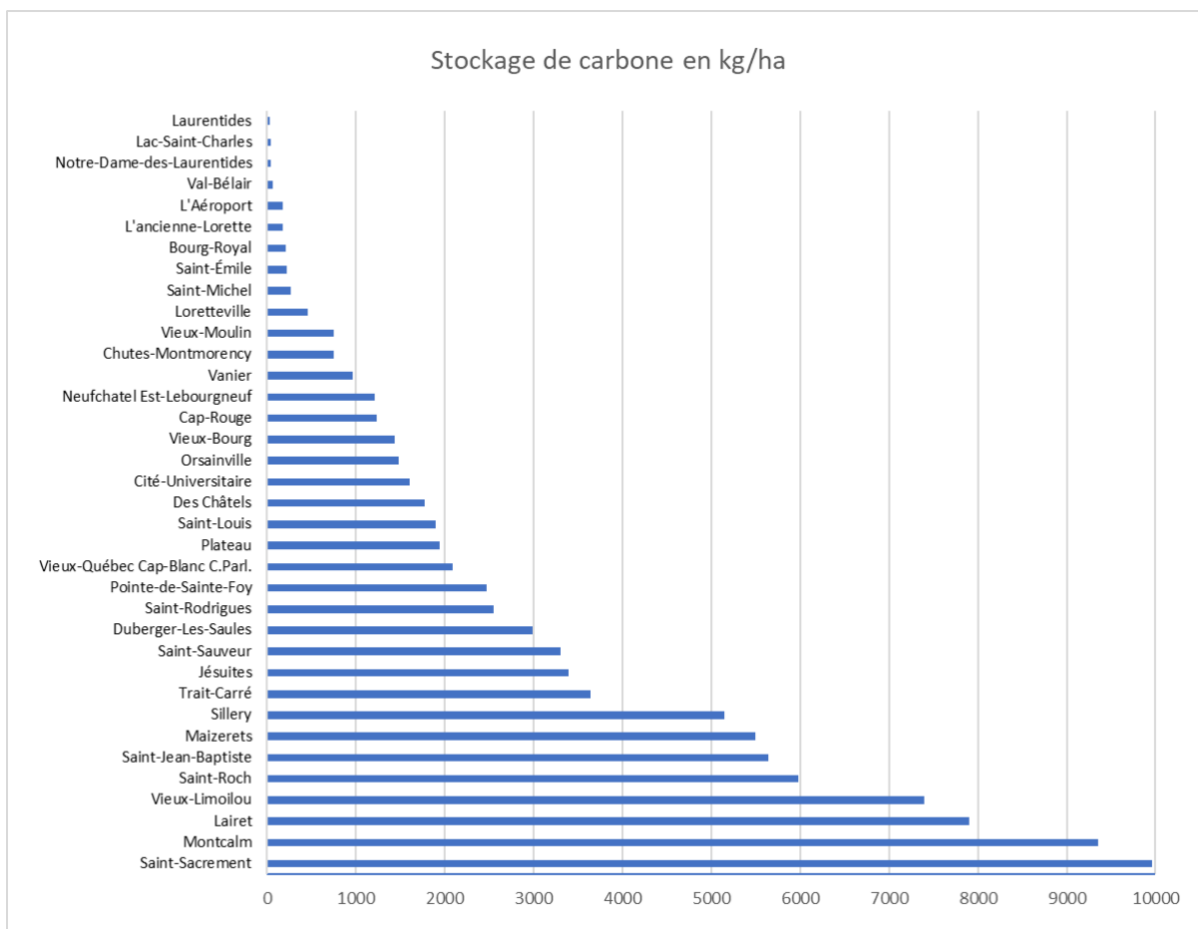


Figure 11 : Stockage de carbone par ha pour chaque quartier

L'avantage de cette méthode est qu'elle est aussi très visuelle. Par exemple on peut voir sur la carte de la figure 11 la séquestration de carbone à l'hectare pour chaque quartier. On remarque que ce sont principalement les quartiers du centre de la ville de Québec qui séquestrent le plus de carbone à l'hectare. C'est aussi l'endroit où l'on retrouve une plus grande quantité de gros arbres.

Séquestration annuelle de carbone en fonction de la superficie des quartiers de Québec

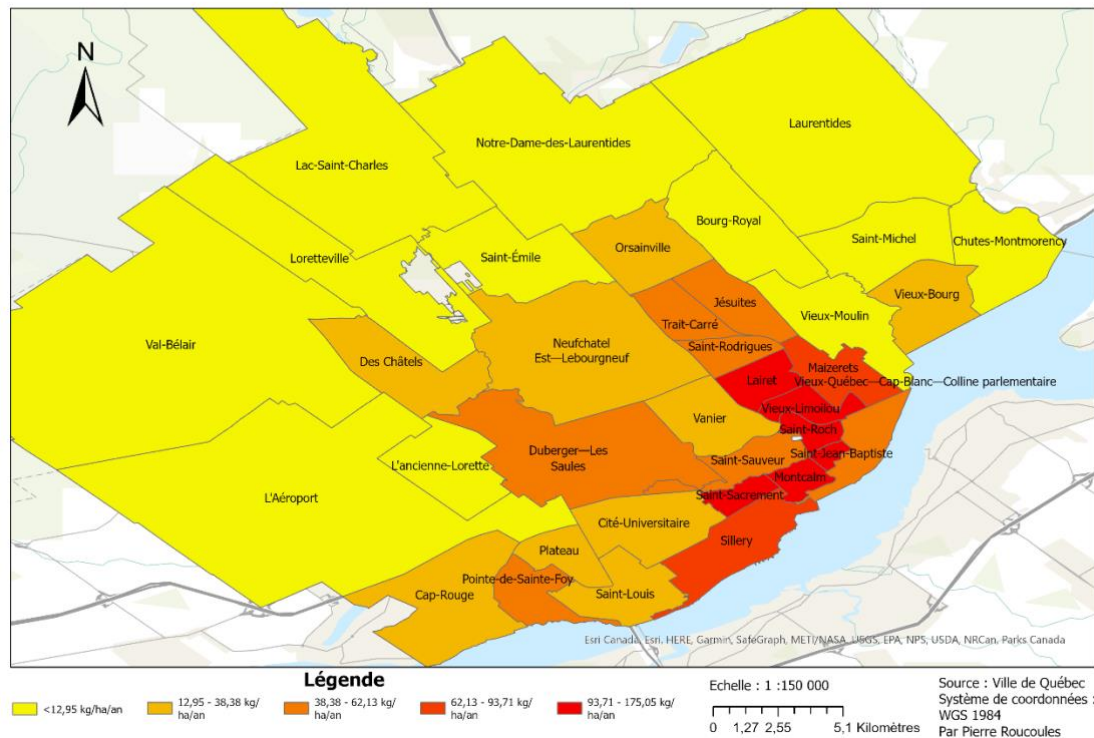


Figure 12 : Représentation cartographique de la séquestration annuelle par hectare

2.2.4. Comparaison avec d'autres forêts urbaines

Une question que l'on peut se poser est comment la ville de Québec se compare à d'autres, vu qu'une fois ramené à une séquestration par hectare, toute ville qu'importe sa taille est comparable. Bien sûr la comparaison entre les villes doit être faite avec prudence, car il existe de nombreux attributs d'une ville qui affectent la structure et les fonctions de la forêt urbaine, toutes les villes ne sont pas soumises au même climat, les données d'inventaires ne sont pas les mêmes ou la méthodologie appliquée diffère.

Des données récapitulatives d'anciennes études effectuées avec i-Tree sont fournies à partir d'autres villes analysées. On peut voir dans le tableau 5 une comparaison des données obtenues pour Québec et pour le quartier de Saint-sacrement (celui ayant le taux densité de stockage et de séquestration) avec celles de quelques villes nord-américaines.

Villes	Nombre d'arbres/ha	Séquestration de carbone en tonne/ha/an	Stockage de carbone en tonne/ha
Atlanta, GA	275,8	1,23	35,7
Toronto, ON, Canada	160,4	0,73	17,4
Boston, MA	82,9	0,67	20,3
New York, NY	65,2	0,48	15,3
San Francisco, CA	55,7	0,39	14,7
Chicago, IL	59,9	0,38	10,9
Los Angeles, CA	48,4	0,36	9,4
Québec	2,8	0,02	0,94

Tableau 5 : Comparaison des données d'i-Tree d'autres villes

Il y a une différence flagrante entre la quantité d'arbres par ha entre Québec et les autres villes, ce qui se reporte forcément sur le taux de séquestration et de stockage à l'hectare qui est bien plus bas que dans les autres villes étudiées. Il a par exemple été inventorié 10 220 000 arbres pour la ville de Toronto. Cependant, il est bon de noter que la base de données utilisés par mon étude et par exemple, celle de l'étude de Toronto n'est pas de la même échelle. En effet, celle-ci prends en compte tous les arbres du « grand Toronto » et donc de sa banlieue, en prenant en compte les arbres publics, privés, ceux présent dans les parcs et boisés, autrement dis l'entièreté de sa canopée forestière (Toronto city, 2017).

Chapitre 3

Discussion

3.1. Avantages

Comme énoncé précédemment les avantages à utiliser le logiciel i-Tree sont nombreux. En plus d'être relativement simple d'utilisation pour l'importation d'une importante base de données comme celle des arbres urbains de la ville de Québec, sa pertinence est réelle, car les équations allométriques de son modèle sont faites pour des arbres nord-américains (Russo & al, 2014). La prise en compte du climat de la ville étudiée est aussi un atout. De plus, de nombreuses possibilités supplémentaires sont possibles en fonction de l'objectif de l'étude telles que l'amélioration de la qualité de l'air, le ruissellement évité des eaux de pluie ou la contribution des arbres municipaux à la régulation de la température. Le calcul de ces paramètres dépend seulement de la disponibilité de certaines données prises lors de l'inventaire des arbres urbains.

Enfin, le logiciel i-Tree est gratuit et disponible facilement, ce qui est très utile pour son utilisation par les villes dans un contexte où elles désireraient faire des estimations pour des plans d'atténuations des changements climatiques.

3.2 Limitations

3.2.1. Données d'inventaire

Le fait que le logiciel i-Tree ne puisse utiliser que l'espèce d'un arbre et son diamètre dans ses équations allométriques pour faire un calcul de stockage et de séquestration de carbone est un avantage d'un point de vue de l'accessibilité. En effet, cette approche simplifiée permet aux utilisateurs disposant de données d'arbres limitées d'exécuter un projet i-Tree ECO, mais elle a des limitations substantielles (USDA Forest Service, 2020). Ainsi, pour une précision augmentée des estimations, en plus des données requises sur les espèces et le DHP pour le calcul de stockage et de séquestration, il est nécessaire d'ajouter les données suivantes :

- Pour le calcul de stockage : Hauteur totale de l'arbre.
- Pour le calcul de séquestration : Hauteur totale de l'arbre, utilisation des terres, santé de la cime, exposition de la cime à la lumière.

Concrètement, seul le DHP, la hauteur de sa position et l'essence sont indispensables aux calculs de stockage et de séquestration avec le logiciel i-Tree (USDA Forest Service, 2020). Cependant, la hauteur de l'arbre peut être une variable dans les équations allométriques du logiciel au même titre que le diamètre, et seulement augmente la véracité et précision des estimations (USDA Forest Service, 2020). De la même façon, la santé de la cime de l'arbre, associé au facteur de croissance attribué à chaque essence, permet d'augmenter la précision du calcul de séquestration (USDA Forest Service, 2020). En effet, il est facilement imaginable qu'un frêne en santé séquestre plus qu'un frêne infecté par l'agrile du frêne qui possède une cime bien dégradée.

Pour chaque absence d'un de ces paramètres, le logiciel i-Tree rentre soit une valeur par défaut, comme pour la santé de la cime qui est alors fixée à 87%, soit une valeur prédite comme pour la hauteur de l'arbre qui est alors déterminée par une équation de régression (USDA Forest Service, 2020).

Malheureusement aucune de ces données n'est disponible dans la base de données issue de l'inventaire des arbres urbains de la ville de Québec, en découle un manque de précision dans l'estimation effectuée. Une recommandation qui pourrait être faite est la prise de certaines de ces données lors des prochaines mises à jour de la base de données lors des prochains inventaires afin, à terme, d'avoir à disposition ces données pour le maximum d'arbre. Évidemment, il est compliqué d'un point de vue de la rapidité d'inventaire de prendre la hauteur de chacun des arbres, mais une estimation pourrait être pertinente. De plus, les données sur la santé de la cime et son exposition sont relativement rapides à prendre, tout compte l'utilisation des terres qui est, dans le logiciel i-Tree, réparti en 14 classes (USDA Forest Service, 2021).

De plus, un autre problème peut être observé dans la base de données. En effet, on peut remarquer dans la figure 3 que se glissent 3 genres en plus des espèces, *Ulmus* avec 5%, *Malus* avec 2,6% et *Tilia* avec 1,4%. Deux raisons justifient la présence de genre dans la répartition des espèces dans la ville de Québec. La première vient directement de l'inventaire forestier où le genre a été rentré à la place de l'espèce par impossibilité d'identification de la sous-espèce ou de la variété, la seconde raison est le tri qui a été effectué et qui a remplacé certains cultivars par leur genre pour rendre utilisable la base de données par i-Tree.

3.2.2. Superficie quartiers

La caractérisation du stockage et de la séquestration annuelle de carbone en une densité par hectare est très pertinente pour une bonne visualisation et à des fins de comparaison. La définition du contour des quartiers extérieurs de la ville ne suit pas le périmètre urbain, or c'est dans celui-ci que sont inventoriés les arbres. Ainsi, les quartiers de L'aéroport, Val-Bélair, Loretteville, Lac-Saint-Charles, Notre-Dame-des-Laurentides, Bourg-Royal et Laurentides, tous situés sur la « partie extérieure » de la ville, disposent d'une grande superficie hors périmètre urbain où aucun arbre n'a été inventorié. Cependant, la totalité de la superficie du quartier est prise en compte lorsque l'on ramène la séquestration et le stockage à une densité par hectare, diminuant drastiquement les valeurs liées à ces quartiers comme on peut le voir à la figure 9 et 10. Ces valeurs ne sont donc pas représentatives de la réalité de ces quartiers. Pour arranger ce problème, il pourrait être envisagé de découper le contour de ces quartiers le long du périmètre urbain, afin d'obtenir une nouvelle superficie, et recommencer le calcul de stockage et de séquestration.

3.3. Possibilités

3.3.1. Analyse individuelle

Une des possibilités qu'offre le logiciel i-Tree eco est de regrouper les données calculées de séquestration et de stockage soit par strates (quartier), soit par espèces par exemple. Une autre fonction permet-elle d'obtenir des résultats individuels, c'est-à-dire que l'on peut savoir avec cette option qu'il y a, par exemple, un peuplier de Lombardie de 80 de DHP qui séquestre annuellement 83 kg de carbone par an. Avoir ces données permettrait une analyse par classe de diamètre et/ou par classe de diamètre et par essence de la séquestration et du stockage de carbone. Il serait ainsi possible de savoir quelle est la cohorte d'arbres située dans une certaine fourchette de diamètre qui séquestre le plus de carbone par exemple. Une précédente étude avait identifié que c'étaient les arbres situés entre 50 et 70 cm de DHP qui séquestrés le plus de carbone, entre 9 et 10 kg de carbone par arbre en moyenne (Wood & al, 2018).

Cependant la taille de la base de données, constituée de plus de 134 000 arbres ne m'a pas permis d'obtenir ces résultats individuels. Il en résulte sur le logiciel i-Tree un rapport d'autant de ligne qu'il ne supporte pas, fermant automatiquement ce dernier. Ainsi, une façon d'obtenir ces résultats serait de segmenter la base de données en tranche d'environ 10 000 occurrences maximum, par exemple en la découpant directement par quartier, et de créer autant de projets i-Tree que de tranches de données afin de réitérer le processus de calcul de séquestration annuelle et de stockage de carbone.

3.3.2. Atténuation des changements climatiques

Les changements climatiques sont un enjeu et un problème d'envergure mondiale. Pour y faire face, les gouvernements ont mis en place un marché du carbone. Des projets visant à réduire les gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère voient le jour, projets menant à la délivrance de crédits dits compensatoires. De l'autre côté, les entreprises polluantes doivent y acheter des crédits compensatoires afin d'équilibrer leurs émissions (Gouvernement du Québec, 2022).

La séquestration annuelle de carbone des arbres urbains de la ville de Québec a été estimée à 834 tonnes/an, soit 3058 tonnes d'équivalent CO₂ par an. Une unité d'un crédit compensatoire correspond à une tonne métrique en équivalent CO₂, les arbres urbains permettraient donc l'émission de 3058 crédits compensatoires annuellement (MFFP, 2017). En 2022, le prix de vente d'un crédit compensatoire est de 18,69\$

(MELCCFP, 2021). On obtient donc annuellement un revenu de 57 154 \$ grâce à la séquestration des arbres urbains de la ville de Québec. Cet argent pourrait être réinvesti par la ville à des fins d'entretiens ou de plantations.

Quand l'on compare ces 3058 tonnes d'équivalent CO₂ aux 8 tonnes qu'émet un québécois par année, cela peut paraître faible (ISQ, 2022). Cependant il faut rappeler que contrairement à l'étude de la forêt urbaine de Toronto, aussi effectuée avec i-Tree, ce n'est pas la même dimension d'inventaires qui est utilisée, car tous les arbres de la canopée participent au calcul, contrairement à la base de données des arbres de Québec (City of Toronto, 2017). Ainsi étudiée, la séquestration de carbone à Québec serait bien plus grande avec tous les parcs et boisés rajoutés ainsi que l'ensemble des arbres privés. Malgré tout, cette séquestration de 3058 tonnes annuelles n'est pas négligeable car elle est faite naturellement par les arbres.

Les quartiers ayant les plus hauts taux de séquestration à l'hectare sont Saint-Sacrement, Montcalm et Lairet, c'est dans ces quartiers que l'investissement d'entretien pourrait être le plus propice. Une analyse individuelle permettrait aussi d'identifier sur quelle gamme de DHP porter notre attention en termes d'entretien.

Conclusion

Naturellement, les arbres séquestrent annuellement du carbone au travers de la photosynthèse pour leur croissance. Ce mécanisme permet de réduire la quantité de gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère. Ainsi, les arbres peuvent être un moyen de lutter contre les changements climatiques. Dans ce cadre-là, il peut être intéressant pour la ville de Québec de savoir la quantité de carbone qui est séquestrée par ses arbres urbains. La base de données des arbres de la ville provenant de l'inventaire urbain ainsi que le logiciel i-Tree ont été utilisés afin d'estimer la quantité de carbone stocké et séquestré.

Le logiciel i-Tree ECO a été choisi grâce à la pertinence de ses équations allométriques basées sur arbres nord-américains, sa capacité à utiliser des données météorologiques issues d'une station située à Québec, son accessibilité et sa facilité d'importer et de gérer de grande quantité de données.

Grâce à ces calculs, la séquestration annuelle de carbone et le stockage total ont pu être analysés sous différents aspects ; par essence, par quartier, par taux à l'hectare. Les quartiers du centre-ville ont été identifiés comme ceux séquestrant le plus de carbone à l'hectare et les érables et ormes, de par leur présence en grand nombre dans nos rues, sont les genres séquestrant le plus dans la ville de Québec.

La ville de Québec, grâce à ses arbres urbains, lutte contre les changements climatiques et permet de compenser l'émission de 3058 tonnes d'équivalent CO₂ chaque année. Cette séquestration peut être valorisée au travers de crédits compensatoires et prodiguer un revenu à la ville en les mettant sur le marché.

Références

- Boyer, D., Gariépy, D., Hakim, H., St-Denis, A. (2020). Plan de foresterie urbaine de la ville de Laval.
- 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.
- Gouvernement du Québec. (2022). Jeu de données « Arbres répertoriés ». [En ligne]. Disponible à https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vque_26/ressource/74b42ebb-755f-4972-9b96-f7fec7118000
- Gouvernement du Québec. (2022). Plan pour une économie verte 2030 – Plan de mise en œuvre 2022-2027.
- Institut de la Statistique au Québec. (2022). Empreinte carbone des ménages au Québec, une première estimation basée sur la consommation.
- Lessard, G., Boulfroy, E. (2008). Les rôles de l'arbre en ville. Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Québec, 21 p.
- McPherson, G.E., Nowak, D.J., Rowntree, R.A. (1994). Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. (2021). Programme de plafonnement et d'échange de la Californie et système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre du Québec.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. (2017). Analyse financière comparative de deux approches de comptabilisation du carbone appliquée à un projet de boisement privé.
- Nowak, D.J., Stevens, J.C., Sisinni, S.M. and Luley, C.J. (2002). Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture*. 28 (3): 113-122.
- Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Ellis, E.; Greenfield, E. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution* 193: 119–129.
- Nowak, D.J. (2021). Understanding i-Tree: Summary of programs and methods. Gen. Tech. Rep. NRS-200-2021. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 100 p.
- Ouranos. (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois, Montréal.

- Paquette, P., Sousa-Silva, R., Maure, F., Cameron, E., Belluau, M., Messier, M., (2021). Praise for diversity: A functional approach to reduce risks in urban forests, *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 62, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127157>.
- Picard N., Saint-André L., Henry M. (2012). Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres : de la mesure de terrain à la prédiction. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, et Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 37–118, doi:10.1017/9781009325844.002.
- Russo, A., Escobedo, F. J., Timilsina, N., Schmitt, A. O., Varela, S., & Zerbe, S. (2014). Assessing urban tree carbon storage and sequestration in Bolzano, Italy. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 10(1), 54–70. <https://doi.org/10.1080/21513732.2013.873822>
- Smith, J.E.; Heath, L.S.; Skog, K.E.; Birdsey, R.A. 2006. Methods for calculating forest ecosystem and harvested carbon with standard estimates for forest types of the United States. Gen. Tech. Rep. NE-343. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station.
- Toronto city. (2017). Every Tree Counts : A portrait of Toronto's urban forest. Parls, forestry and recreation urban forestry.
- USDA Forest Service. (2020). I-Tree ECO guide to Data limitations
- USDA Forest Service. (2021). I-Tree ECO field guide v6
- Ville de Québec. (2008). Plan Directeur des milieux naturels et de la forêt urbaine – Tome 2 : La forêt urbaine.
- Wood, S.L.R., Dupras, J., Delagrangé, 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

Tableau 6 : Stockage et séquestration annuelle par espèces

Essences	Séquestration annuelle de carbone en tonne/an	Stockage de carbone en tonne
<i>Acer platanoides</i>	165,54	7033,8
<i>Ulmus americana</i>	118,93	6388,7
<i>Acer saccharinum</i>	114,65	9817,8
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	44,21	2312,6
<i>Quercus rubra</i>	35,47	2263,4
<i>Tilia cordata</i>	34,59	2015,7
<i>Tilia</i>	33,18	1824,6
<i>Acer rubrum</i>	32,33	960,9
<i>Ulmus</i>	22,45	527,8
<i>Acer x freemanii</i>	16,92	283,6
<i>Acer saccharum</i>	16,19	1 401,1
<i>Ulmus pumila</i>	15,76	637,8
<i>Populus deltoides</i>	15,41	1 633,3
<i>Syringa reticulata</i>	14,29	320,3
<i>Malus</i>	11,44	371,1
<i>Fraxinus americana</i>	9,31	517,6
<i>Betula papyrifera</i>	7,79	260,4
<i>Tilia americana</i>	6,91	416,4
<i>Gleditsia triacanthos</i>	6,90	170,9
<i>Picea pungens</i>	6,51	484
<i>Fraxinus</i>	6,33	389,7
<i>Picea glauca</i>	5,67	352,6
<i>Acer negundo</i>	5,20	233
<i>Picea abies</i>	5,01	324,9
<i>Salix</i>	4,79	698,7
<i>Quercus palustris</i>	4,12	91,7
<i>Ulmus glabra</i>	3,96	165,3
<i>Tilia mongolica</i>	3,78	80,4
<i>Gleditsia</i>	3,41	136,6
<i>Pinus nigra</i>	3,31	186,8
<i>Pinus strobus</i>	2,81	170,2
<i>Acer tataricum</i>	2,69	91,9
<i>Quercus robur</i>	2,61	80,1
<i>Celtis occidentalis</i>	2,57	47,3
<i>Sorbus intermedia</i>	2,49	83,6
<i>Larix laricina</i>	2,38	73,7
<i>Populus balsamifera</i>	2,22	97,5

<i>Gymnocladus</i>	1,98	24,6
<i>Populus</i>	1,87	129,4
<i>Pinus sylvestris</i>	1,84	75,5
<i>Quercus macrocarpa</i>	1,67	92,8
<i>Picea</i>	1,56	62
<i>Pinus resinosa</i>	1,30	53,1
<i>Crataegus</i>	1,25	47,7
<i>Fraxinus excelsior</i>	1,17	60,3
<i>Quercus</i>	1,16	63
<i>Amelanchier</i>	1,14	20,4
<i>Picea omorika</i>	1,14	29,6
<i>Thuja</i>	1,11	47,7
<i>Amelanchier canadensis</i>	1,08	10,3
<i>Populus nigra</i>	1,08	40,3
<i>Populus tremuloides</i>	1,08	36,4
<i>Betula</i>	1,05	39,3
<i>Prunus virginiana</i>	1,02	18
<i>Sorbus</i>	0,99	35,1
<i>Populus canescens</i>	0,86	28,4
<i>Ulmus rubra</i>	0,79	33,4
<i>Juglans cinerea</i>	0,71	40,8
<i>Fagus grandifolia</i>	0,70	59,4
<i>Acer</i>	0,69	34,5
<i>Betula alleghaniensis</i>	0,67	40,5
<i>Sorbus aucuparia</i>	0,65	15,3
<i>Aesculus</i>	0,63	32,3
<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,61	35,4
<i>Betula populifolia</i>	0,60	22,4
<i>Thuja occidentalis</i>	0,58	39,2
<i>Larix decidua</i>	0,52	32,4
<i>Aesculus glabra</i>	0,51	10,6
<i>Phellodendron amurense</i>	0,50	16,2
<i>Larix</i>	0,47	26,5
<i>Populus grandidentata</i>	0,42	18,6
<i>Sorbus americana</i>	0,41	12,5
<i>Quercus alba</i>	0,40	26,6
<i>Pinus banksiana</i>	0,36	6,9
<i>Prunus</i>	0,33	9,2
<i>Betula pendula</i>	0,31	11,2
<i>Populus tremula</i>	0,29	2,7
<i>Juglans nigra</i>	0,28	12,1
<i>Populus alba</i>	0,27	27,7
<i>Salix babylonica</i>	0,27	22,6
<i>Elaeagnus angustifolia</i>	0,24	8,1

<i>Ginkgo biloba</i>	0,24	7,1
<i>Betula nigra</i>	0,23	3,5
<i>Malus baccata</i>	0,22	6
<i>Tsuga canadensis</i>	0,22	20
<i>Ostrya virginiana</i>	0,21	9,6
<i>Populus x canescens</i>	0,21	54,2
<i>Crataegus crus-galli</i>	0,19	2,3
<i>Fagus</i>	0,19	8,6
<i>Salix alba</i>	0,18	15,5
<i>Abies balsamea</i>	0,16	8,6
<i>Sorbus x thuringiaca</i>	0,14	3,1
<i>Ulmus davidiana</i>	0,14	2,1
<i>Pinus</i>	0,13	5
<i>Abies</i>	0,12	5,3
<i>Corylus colurna</i>	0,12	3,3
<i>Juglans</i>	0,12	13,2
<i>Maackia amurensis</i>	0,12	1,7
<i>Prunus pensylvanica</i>	0,12	2,4
<i>Ulmus thomasi</i>	0,12	4,5
<i>Syringa vulgaris</i>	0,11	4
<i>Fraxinus quadrangulata</i>	0,10	3,3
<i>Quercus bicolor</i>	0,10	2,5
<i>Sorbus decora</i>	0,10	2,3
<i>Tilia platyphyllos</i>	0,10	10,5
<i>Alnus</i>	0,09	2,6
<i>Larix kaempferi</i>	0,09	2,6
<i>Populus x berolinensis</i>	0,08	5,9
<i>Prunus maackii</i>	0,08	2,2
<i>Pyrus</i>	0,08	2,4
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,07	4,4
<i>Quercus coccinea</i>	0,07	0,6
<i>Prunus padus</i>	0,06	1
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,06	4
<i>Abies concolor</i>	0,05	3
<i>Carpinus</i>	0,05	0,6
<i>Chamaecyparis pisifera</i>	0,05	3,8
<i>Fraxinus nigra</i>	0,05	3,3
<i>Pinus cembra</i>	0,05	4,3
<i>Pinus mugo</i>	0,05	2,8
<i>Pinus parviflora</i>	0,05	6,5
<i>Acer miyabei</i>	0,04	0,3
<i>Picea mariana</i>	0,04	2,2
<i>Pyrus calleryana</i>	0,04	0,7
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	0,03	1

<i>Pyrus communis</i>	0,03	0,1
<i>Quercus ellipsoidalis</i>	0,03	0,3
<i>Abies alba</i>	0,02	1,7
<i>Acer pensylvanicum</i>	0,02	1,2
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,02	0,5
<i>Betula platyphylla</i>	0,02	0,5
<i>Carya ovata</i>	0,02	0,5
<i>Platanus</i>	0,02	0,1
<i>Platanus occidentalis</i>	0,02	0,1
<i>Tilia tomentosa</i>	0,02	0,2
<i>Viburnum lentago</i>	0,02	0,5
<i>Abies fraseri</i>	0,01	0,8
<i>Abies koreana</i>	0,01	0,1
<i>Abies lasiocarpa</i>	0,01	0,6
<i>Acer spicatum</i>	0,01	0,2
<i>Alnus glutinosa</i>	0,01	0,1
<i>Catalpa</i>	0,01	0,2
<i>Carya cordiformis</i>	0,01	0,2
<i>Catalpa ovata</i>	0,01	0,1
<i>Liriodendron tulipifera</i>	0,01	0,2
<i>Magnolia</i>	0,01	0,2
<i>Morus alba</i>	0,01	0,3
<i>Pinus aristata</i>	0,01	0,7
<i>Pinus ponderosa</i>	0,01	0,4
<i>Prunus serotina</i>	0,01	0,2
<i>Quercus petraea</i>	0,01	0,7
<i>Rhus typhina</i>	0,01	0,3
<i>Salix pentandra</i>	0,01	0,1
<i>Aesculus x carnea</i>	0,00	0
<i>Alnus incana</i>	0,00	0
<i>Betula pumila</i>	0,00	2,7
<i>Catalpa speciosa</i>	0,00	0
<i>Cladrastis</i>	0,00	0,1
<i>Crataegus punctata</i>	0,00	3,3
<i>Eucommia ulmoides</i>	0,00	0
<i>Fagus sylvatica</i>	0,00	0
<i>Fraxinus mandshurica</i>	0,00	0,1
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0,00	0
<i>Picea asperata</i>	0,00	0
<i>Pinus densiflora</i>	0,00	0,1
<i>Ptelea trifoliata</i>	0,00	0,1
<i>Pyrus ussuriensis</i>	0,00	0
<i>Salix fragilis</i>	0,00	0
Total	834,01	44 727,1

Tableau 7 : Stockage et séquestration annuelle par quartier

Strates/Quartier	Séquestration annuelle de carbone en tonne/an	Stockage de carbone en tonne
Duberger-Les-Saules	101,35	5 796,9
Neufchâtel Est-Lebourgneuf	68,61	2 790,9
Sillery	55,56	3 902,6
Maizerets	43,2	2 531,3
Lairet	40,94	2 480,0
Des Châtel	35,01	1 618,8
Cap-Rouge	34,96	1 567,3
Vieux-Limoilou	31,37	1 805,7
Saint-Sacrement	29,76	1 694,0
Saint-Sauveur	24,6	1 307,4
Montcalm	24,52	1 636,4
Jésuites	24,36	1 634,8
Cité-Universitaire	23,23	1 274,7
Pointe-de-Sainte-Foy	23,04	1 059,2
Saint-Louis	21,99	1 141,9
Trait-Carré	20,83	1 315,8
L'Aéroport	20,49	923,2
Saint-Roch	19,38	914,1
Vieux-Québec Cap-Blanc C.Parl.	18,36	896,9
Orsainville	16,49	1 132,5
Loretteville	15,72	920,5
Vanier	15,3	603,2
Vieux-Bourg	15,24	957,4
Plateau	13,44	689,2
Vieux-Moulin	11,98	691,3
Val-Bélair	11,91	423,9
Chutes-Montmorency	11,71	682,6
Saint-Rodrigues	11,28	686
Saint-Émile	8,68	225,4
Saint-Michel	8,43	240,7
Saint-Jean-Baptiste	8,34	383,5
Bourg-Royal	6,21	233,2
Notre-Dame-des-Laurentides	5,64	155,3
Lac-Saint-Charles	4,59	155,7
Laurentides	4,25	123,2
L'ancienne-Lorette	3,27	131,3
Aire d'étude	834,01	44 727,1

Tableau 8 : Stockage et séquestration annuelle par superficie pour chaque quartier

Strates/Quartier	Séquestration annuelle de carbone en kg/an/ha	Stockage de carbone en kg/ha
Saint-Sacrement	175,05	9 964,8
Montcalm	140,12	9 350,9
Lairet	130,37	7 898,2
Vieux-Limoilou	128,55	7 400,2
Saint-Roch	126,68	5 974,6
Saint-Jean-Baptiste	122,66	5 640,3
Maizerets	93,71	5 490,8
Sillery	73,30	5 148,6
Saint-Sauveur	62,13	3 301,6
Trait-Carré	57,69	3 645,0
Pointe-de-Sainte-Foy	53,83	2 474,9
Duberger-Les-Saules	52,19	2 985,0
Jésuites	50,53	3 391,8
Vieux-Québec Cap-Blanc C.Parl.	42,80	2 090,6
Saint-Rodrigues	41,93	2 550,1
Des Châtel	38,38	1 775,0
Plateau	37,75	1 936,1
Saint-Louis	36,59	1 900,1
Neufchâtel Est-Lebourgneuf	29,84	1 214,0
Cité-Universitaire	29,22	1 603,4
Cap-Rouge	27,49	1 232,1
Vanier	24,44	963,6
Vieux-Bourg	22,74	1 429,0
Orsainville	21,61	1 484,3
Vieux-Moulin	12,95	747,3
Chutes-Montmorency	12,90	751,8
Saint-Michel	9,18	262,2
Saint-Émile	8,26	214,5
Loretteville	7,76	454,6
Bourg-Royal	5,41	203,2
L'ancienne-Lorette	4,24	170,6
L'Aéroport	3,75	169
Val-Bélair	1,60	57
Notre-Dame-des-Laurentides	1,56	42,9
Lac-Saint-Charles	1,19	40,5
Laurentides	0,95	27,6
Aire d'étude	17,54	940,90