

LA SÉQUESTRATION NATURELLE DE CARBONE EN MILIEU URBAIN : UN OUTIL DE LUTTE  
CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À PROMOUVOIR!

Par  
Michel Vararoath Meas

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de  
l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Monsieur François Lafortune

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Octobre 2016

## SOMMAIRE

Mots-clés : changements climatiques, potentiel de séquestration, séquestration de carbone, milieu urbain, effet d'entraînement, verdissement urbain, toits verts, murs végétaux, arbres urbains, végétalisation

La lutte contre les changements climatiques représente un enjeu majeur en ce XXI<sup>e</sup> siècle. L'objectif principal de cet essai est d'évaluer le rôle que peut jouer la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain dans ce combat au Québec. L'absorption du CO<sub>2</sub>, principal gaz à effet de serre, par la photosynthèse s'avère être une alternative permettant de compenser en partie les émissions carboniques en milieu urbain — un milieu propice pour effectuer divers types d'aménagement de verdissement urbain, comme aménager des toits verts, des murs végétaux ainsi que planter des arbres. À ces égards, les principales conditions favorisant la séquestration de carbone en milieu urbain ont été étudiées. Aussi, une analyse économique a permis d'évaluer la faisabilité de l'implantation de ces techniques de verdissement dans un contexte urbain québécois. En fait, il s'avère économiquement intéressant de procéder aux verdissements des villes puisque les avantages financiers, sociaux et environnementaux qui en découlent justifient l'investissement. À titre d'exemple, soulignons qu'un arbre moyen représente des bénéfices socio-environnementaux de 100 \$ annuellement globalement pour la collectivité et l'individu. L'essor du verdissement urbain est favorisé par ailleurs par des mesures incitatives à ce sujet. Quelques pays et villes ont également été cités pour mettre en perspective les incitatives financières et réglementaires qu'ils utilisent.

Qui plus est, il a été calculé, de façon sommaire, que le potentiel combiné de séquestration de CO<sub>2</sub> par ces principales techniques de verdissement urbain est considérable. À titre de référence, si 50 % des toits et des murs étaient végétalisés et que le couvert arboré au Québec atteignait également 50 %, alors c'est plus de 3 M t CO<sub>2</sub> / an qui pourraient être séquestré en milieu urbain, soit une quantité représentant près de 5 % des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> québécois.

En outre, la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain pourrait jouer un double rôle dans la lutte contre les changements climatiques; celui de la séquestration de carbone, certes, mais également en matière de la conscientisation environnementale — élément pouvant favoriser un mouvement de masse pour mieux lutter contre les changements climatiques.

## **REMERCIEMENTS**

Cet essai représente la concrétisation d'une étape de ma vie et grâce à cela je me sens plus prêt que jamais à me joindre parmi les acteurs qui promeuvent le respect de l'environnement.

Ainsi, je tiens à remercier dans un premier temps mon directeur d'essai M. François Lafortune, Ph. D. pour ses suggestions minutieuses et ses réflexions visant à améliorer le produit final. Je le remercie également d'avoir accepté de réviser mes calculs en lien avec le potentiel de séquestration naturelle de carbone en milieu urbain au Québec.

Je remercie aussi M. Christopher Naud, D.Ps, lequel m'a partagé, par le biais d'une entrevue, sa réflexion philosophique portant sur la situation psychologique de l'être humain dans sa relation avec l'environnement.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	4
1.1 La COP21.....	4
1.2 Les objectifs ambitieux de réduction de GES du Québec.....	6
1.3 L'urbanisation.....	7
1.4 Cadre d'insertion de cet essai.....	7
2. LA SÉQUESTRATION DE CARBONE.....	9
2.1 Quelques traités ou conventions internationaux incorporant la séquestration de carbone.....	9
2.1.1 Le Protocole de Kyoto.....	9
2.1.2 L'Accord de Paris.....	9
2.2 En quoi consiste la séquestration de carbone?.....	10
2.3 La séquestration naturelle de carbone.....	12
2.3.1 Le cycle du carbone.....	12
2.4 La séquestration naturelle de carbone en milieu urbain.....	14
2.4.1 Quelques études sur la séquestration de carbone en milieu urbain dans le monde.....	15
2.4.2 La photosynthèse.....	17
3. LE VERDISSEMENT URBAIN.....	19
3.1 Toits verts.....	19
3.1.1 Présentation des toits verts.....	19
3.1.2 Les conditions favorisant la séquestration.....	22
3.1.3 Faisabilité économique.....	24
3.2 Murs végétaux.....	25
3.2.1 Présentation des murs végétaux.....	26
3.2.2 Les conditions favorisant la séquestration.....	31
3.2.3 Faisabilité économique.....	34
3.3 Les arbres en milieu urbain.....	37

3.3.1	Présentation des arbres urbains.....	37
3.3.2	Les conditions favorisant la séquestration.....	40
3.3.3	Faisabilité économique.....	45
4.	LES POLITIQUES, MESURES OU INCITATIFS EN MATIÈRE DE VERDISSEMENT	
	URBAIN DANS LE MONDE.....	49
4.1	L'Allemagne, le pays des toits verts.....	49
4.2	Toronto, un essor en toits verts.....	50
4.3	Paris et ses murs végétaux.....	53
4.4	Atlanta, la ville dans une forêt.....	56
4.4.1	Planter.....	56
4.4.2	Conserver.....	57
4.4.3	Éduquer.....	58
5.	ESTIMATION DU POTENTIEL DE SÉQUESTRATION NATURELLE DE CARBONE EN	
	MILIEU URBAIN AU QUÉBEC.....	59
5.1	Le contexte urbain du Québec de 1867 à aujourd'hui.....	59
5.2	Estimation du potentiel de séquestration de carbone par les toits verts.....	60
5.2.1	Détermination de la superficie des toits résidentiels au Québec.....	60
5.2.2	Détermination du potentiel de séquestration de carbone par les toits verts dans le secteur résidentiel.....	63
5.2.3	Estimation du taux de séquestration de carbone par les toits verts semi-intensifs.....	65
5.2.4	Détermination de la superficie des toits non résidentiels au Québec.....	70
5.2.5	Détermination du potentiel de séquestration totale de carbone par les toits verts au Québec.....	72
5.3	Estimation du potentiel de séquestration de carbone par les murs végétaux.....	74
5.3.1	Détermination de la superficie des murs résidentiels au Québec.....	75
5.3.2	Détermination de la superficie des murs résidentiels et ICI au Québec.....	77
5.3.3	Détermination du potentiel de séquestration de carbone des murs végétaux au Québec.....	80
5.4	La séquestration de carbone par les arbres urbains.....	81

5.4.1	Détermination de l'indice de canopée des arbres en milieu urbain au Québec .....	82
5.4.2	Séquestration actuelle de carbone au-dessus de la surface du sol.....	83
5.4.3	Séquestration actuelle de carbone par les arbres urbains sous la surface du sol.....	87
5.4.4	Séquestration actuelle de carbone au-dessus et en dessous de la surface du sol.....	88
5.4.5	Estimations du potentiel de séquestration de carbone par les arbres au-dessus de la surface du sol en milieu urbain au Québec.....	90
5.4.6	Estimation du potentiel de séquestration de carbone en milieu urbain par les arbres au-dessus et en dessous de la surface du sol au Québec .....	92
5.5	Synthèse du potentiel de séquestration de carbone par le verdissement urbain .....	95
6.	EFFET D'ENTRAÎNEMENT .....	98
6.1	Pourquoi un changement? .....	98
6.2	La théorie du changement de Raubenheimer .....	98
6.3	La séquestration naturelle de carbone en milieu urbain : un vecteur de changement? .....	100
7.	RECOMMANDATIONS.....	104
7.1	Stratégie 1 : Créer le savoir québécois en matière de séquestration naturelle de carbone en milieu urbain .....	105
7.1.1	Moyen 1.1 : Coopérer notamment avec les scientifiques, les horticulteurs, les ingénieurs, les citoyens et les municipalités pour codocumenter les bonnes pratiques de verdissements et ses avantages.....	106
7.1.2	Moyen 1.2 : Valider les règles de bonnes pratiques de verdissement urbain par des expérimentations réelles .....	106
7.2	Stratégie 2 : Informer/sensibiliser .....	107
7.2.1	Moyen 2.1 : Diffuser les informations relatives à la séquestration de carbone par le verdissement en milieu urbain dans les médias .....	107
7.2.2	Moyen 2.2 : Tenir des réunions de concertation avec les différentes parties prenantes en vue de sensibiliser autant les acteurs de la société civile que les décideurs politiques.....	108
7.3	Stratégie 3 : Agir/verdir .....	108

7.3.1	Moyen 3.1 : Fournir des incitatifs favorisant une augmentation de la séquestration de carbone par des techniques de verdissement en milieu urbain .....	109
7.3.2	Moyen 3.2 : Appliquer les bonnes pratiques de verdissement urbain pour végétaliser les murs, les toits et les espaces disponibles.....	110
	CONCLUSION .....	111
	RÉFÉRENCES.....	113

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 2.1	Le cycle global du carbone .....	11
Figure 2.2	Accumulation et absorption de carbone atmosphérique .....	13
Figure 2.3	Le cycle global du carbone et son cycle organique.....	14
Figure 2.4	Équation globale de la photosynthèse .....	18
Figure 3.1	Les composantes d'un toit vert.....	21
Figure 3.2	Types de murs végétaux et leurs sous-catégories.....	27
Figure 3.3	Exemples de murs végétalisés avec substrat de croissance.....	29
Figure 3.4	Composantes d'un mur végétal hydroponique .....	30
Figure 3.5	Mur végétal hydroponique du Musée du Quai Branly, Paris .....	31
Figure 3.6	Vigne de vierge .....	33
Figure 3.7	Lierre de Boston.....	33
Figure 3.8	Hydrangée grimpante.....	33
Figure 3.9	Clématite .....	33
Figure 3.10	Le frêne noir et l'orme d'Amérique.....	38
Figure 3.11	L'agrile du frêne .....	39
Figure 3.12	Potentiel de réchauffement climatique d'une poutre de 7,3 m supportant une charge de 14,4 kN/m.....	44
Figure 4.1	Palmarès des dix villes en Amérique du Nord ayant installé le plus de toits verts en 2013 en superficie .....	51
Figure 4.2	Palmarès des dix villes en Amérique du Nord ayant installé le plus de toits verts en 2014 en superficie .....	51
Figure 4.3	Emplacements des 41 projets de murs végétaux à réaliser à Paris.....	54
Figure 4.4	Quelques réalisations de murs végétaux à Paris signée Patrick Blanc.....	55
Figure 5.1	Superficies installées par types de toits verts en 2014 en Amérique du Nord .....	64
Figure 5.2	Courbe du taux instantané de séquestration de carbone d'un arbre dans le temps .....	67
Figure 5.3	Part économique du secteur de la construction en 2014.....	70



Figure 5.4	Pourcentage de la superficie estimée des toits par secteur .....	71
Figure 5.5	Part économique du secteur de la construction en 2014.....	78
Figure 5.6	Pourcentage des superficies estimées des murs par secteur au Québec .....	79
Figure 5.7	Potentiel de séquestration de CO <sub>2</sub> nette au-dessus du sol par les arbres urbains en fonction de l'indice de canopée au Québec .....	92
Figure 5.8	Potentiel de séquestration de CO <sub>2</sub> nette en dessous et au-dessus du sol par les arbres urbains en fonction de l'indice de canopée au Québec.....	94
Figure 5.9	Potentiel théorique maximal de séquestration de carbone par les différentes techniques de verdissement urbain .....	96
Figure 6.1	Théorie du changement .....	99
Tableau 1.1	Probabilité de réchauffement climatique selon différents scénarios.....	5
Tableau 3.1	Caractéristiques principales des toits verts extensifs et intensifs.....	21
Tableau 3.2	Les coûts approximatifs de l'implantation des toits verts.....	24
Tableau 3.3	Les types de plantes grimpantes et leurs besoins en support .....	28
Tableau 3.4	Conditions favorisant la séquestration de carbone par les murs végétalisés au Québec.....	34
Tableau 3.5	Coûts d'installations et d'entretiens relatifs aux différents types de murs végétaux .....	35
Tableau 3.6	Avantages financiers des murs végétaux .....	36
Tableau 3.7	Estimation extrapolée des bénéfices socio-environnementaux d'un arbre urbain québécois .....	47
Tableau 4.1	Pourcentage du toit devant être recouvert de verdure par réglementation municipale torontoise .....	52
Tableau 5.1	Type de construction résidentielle au Québec .....	60
Tableau 5.2	Calculs estimant la superficie totale des toits résidentiels au Québec .....	62
Tableau 5.3	Nombre d'arbres nécessaires pour séquestrer une tonne de carbone en 100 ans .....	66
Tableau 5.4	Taux de séquestration de carbone par type de toits verts.....	68
Tableau 5.5	Potentiel estimatif maximal de séquestration de carbone par les toits verts résidentiels au Québec.....	69

Tableau 5.6	Superficie totale estimée des toits par secteur .....	71
Tableau 5.7	Potentiel estimé de séquestration totale de carbone par les toits .....	73
Tableau 5.8	Types de constructions résidentielles au Québec.....	75
Tableau 5.9	Calculs estimant la superficie totale des murs résidentiels au Québec .....	77
Tableau 5.10	Superficie totale estimée des murs au Québec .....	79
Tableau 5.11	Potentiel maximal de séquestration de carbone au Québec par les murs végétaux .....	80
Tableau 5.12	Estimation de l'indice de canopée des arbres au Québec dans les principaux centres urbains .....	83
Tableau 5.13	Séquestration de carbone au-dessus de la surface sol par les arbres urbains des principaux centres de population du Québec.....	85
Tableau 5.14	Séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol par les arbres urbains de l'ensemble du territoire urbain du Québec .....	86
Tableau 5.15	Séquestration de carbone de l'ensemble du territoire urbain du Québec par les arbres urbains au-dessus et en dessous de la surface du sol .....	89
Tableau 5.16	Potentiel de séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol par les arbres urbains de l'ensemble du territoire urbain du Québec selon l'indice de canopée urbaine .....	90
Tableau 5.17	Potentiel de séquestration de carbone au-dessus et en dessous de la surface du sol par les arbres urbains de l'ensemble du territoire urbain du Québec selon l'indice de canopée urbaine .....	93
Tableau 5.18	Potentiel combiné de séquestration de CO <sub>2</sub> par le verdissement urbain.....	95
Tableau 7.1	Résumé des recommandations visant à promouvoir la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain comme outil de lutte contre les changements climatiques .....	105

## LISTE DES ACRONYMES DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AAPQ	Association des architectes paysagistes du Québec
AGPI	Association des gestionnaires des parcs immobiliers institutionnels
AQPP	Association québécoise des producteurs en pépinières
C	Carbone
CaGBC	<i>Canada Green Building Council</i>
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CEBQ	Conseil de l'enveloppe du bâtiment du Québec
CECOBOIS	Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois
CEUM	Centre d'écologie urbaine de Montréal
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CODIFAB	Comité professionnel de développement des industries françaises de l'ameublement et du bois
COP21	La vingt-et-unième session de la Conférence des Parties
CRE	Centre régional de l'environnement
CSC	Captage et séquestration de carbone
ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
FD	Facteur de division
FM	Facteur multiplicatif
FIHOQ	Fédération interdisciplinaire de l'horticulture ornementale du Québec
FLL	<i>Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau</i>
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GT	Gigatonne
Ha	Hectare
ICA	Indice de canopée arboré
ICAU	Indice de canopée des arbres urbains
ICI	Institutionnel, commercial et industriel

IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MAMOT	Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
OECD	<i>Organisation for Economic Cooperation and Development</i>
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
RNC	Ressources <i>naturelles</i> Canada
SMART	Spécifique, mesurable, atteignable, raisonnable et temps
SCHL	Société canadienne d'hypothèques et de logements
UQAM	Université du Québec à Montréal
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
UV	Ultra-violet

## INTRODUCTION

Tout d'abord, l'auteur de cet essai aimerait souhaiter au lecteur la bienvenue dans le monde anthropocène... là où les activités de l'Homme dominant et menacent la planète. Depuis les travaux recueillis par Dr Keeling en 1958 (Keeling, 1998) sur l'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub>, la science établit clairement un lien entre les activités de l'être humain et le changement climatique. En effet, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) affirme ceci :

« l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie et, aujourd'hui, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont les plus élevées jamais observées » (GIEC, 2014).

Les conséquences qui en découlent sont d'un ordre de grandeur titanesque pouvant même mettre en danger leur propre existence. *L'homo sapiens* devra une fois de plus prouver sa capacité de résilience face à l'urgence d'agir contre les changements climatiques. En décembre 2015, alors que les représentants des instances gouvernementales de toutes les parties du monde signèrent l'Accord de Paris dans un esprit de coopération internationale sans précédent, le Québec s'est affiché comme leader en matière de lutte contre les changements climatiques en se dotant, à la suite de la COP21, de cibles de réduction de gaz à effet de serre (GES) très ambitieuse. Tellement ambitieuses sont-elles, qu'il est de plus haute importance de prendre en considération toutes les opportunités en matière de réduction de GES qu'il est possible de concevoir, à défaut de quoi, l'on risque de ne pas parvenir à atteindre les objectifs de réduction auxquels le gouvernement du Québec s'est engagé. Compte tenu de cet engagement ambitieux du gouvernement, cet essai, portant sur la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain comme outil de lutte contre les changements climatiques à promouvoir, s'arrime avec cette volonté de lutter contre les changements climatiques pour le bien-être des générations futures et de l'environnement.

En fait, l'objectif principal de cet essai consiste à évaluer le rôle que joue la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain comme outil de lutte contre les changements climatiques dans une perspective de développement durable en vue de favoriser une meilleure intégration de la nature dans le mode de vie des citoyens. L'atteinte de cet objectif principal est conditionnée par l'atteinte de trois sous-objectifs. Le premier sous-objectif consiste à exposer un portrait de ce qui se fait en matière de séquestration et d'en faire une analyse économique sommaire en vue de déterminer la faisabilité des différentes mesures de verdissement urbain permettant de favoriser la séquestration de carbone. Le deuxième consiste à estimer sommairement et de manière approximative, selon les données disponibles et limites de temps pour la réalisation de l'essai, le potentiel de captage de CO<sub>2</sub> par la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain au Québec, et ce, en particulier par des approches de verdissement urbain. Le troisième sous-

objectif consiste à mettre en perspective l'effet d'entraînement des approches de séquestration de carbone notamment celui du verdissement urbain sur le changement d'une culture ou d'un mode de vie d'une société plus en harmonie avec l'environnement.

La réalisation de cet essai est appuyée par une méthodologie scientifique ayant pour objectif d'assurer un haut niveau de qualité pour ce travail. En effet, une revue de la littérature a permis de dresser le bilan de la situation à l'égard de ce qui se fait actuellement, tant au Québec qu'à l'international, en matière de séquestration urbaine de carbone dans une vision de lutte contre les changements climatiques. Les informations contenues dans l'essai ont été puisées de sources qui, autant que possible, reposent sur une notoriété reconnue de l'auteur de la source ou de l'organisation. En outre, une entrevue avec un expert dans le domaine de la psychologie a été effectuée en vue de connaître son point de vue sur l'influence psychologique du verdissement urbain sur l'effet d'entraînement que cela peut engendrer sur le changement vers un système plus écoresponsable. Ce n'est qu'après une analyse critique des informations recueillies — par la littérature et par l'entrevue — que des recommandations ont pu être formulées. Qui plus est, l'estimation sommaire du potentiel de séquestration de carbone au Québec a également suivi une méthodologie précise permettant d'obtenir une idée générale sur l'ordre de grandeur de ce potentiel de séquestration. En effet, les données recensées, notamment dans des bases de données crédibles, ont permis d'obtenir une bonne estimation du potentiel de séquestration de carbone au Québec. En outre, ces calculs ont été vérifiés par mon directeur de thèse, M. François Lafortune, Ph. D., afin de s'assurer que les calculs sont valides, même si ceux-ci sont des approximations.

Enfin, la lecture de ce travail se déroulera en sept chapitres. Le premier chapitre permet d'exposer les principales problématiques associées aux changements climatiques et de situer l'essai dans ce contexte.

Le deuxième chapitre aborde la thématique de la séquestration de carbone en présentant d'abord quelques traités internationaux en lien avec la séquestration de carbone, puis en expliquant, de façon un peu plus détaillée, en quoi consiste la séquestration naturelle de carbone.

Le troisième chapitre consiste à exposer les principales techniques de verdissement urbain et d'évaluer leurs faisabilités économiques dans un contexte québécois. Les trois principaux modes de verdissement urbain s'avèrent être les toits verts, les murs végétaux ainsi que les arbres en milieu urbain.

Le quatrième chapitre porte sur les principales politiques, mesures ou incitatifs en matière de verdissement urbain dans le monde. Un regard particulier est porté sur quelques villes et pays qui se sont démarqués

dans leurs mises en application de mesures ou programmes qui ont permis de favoriser un essor en verdissement urbain dans leurs milieux respectifs.

Le cinquième chapitre consiste à procéder à des calculs permettant d'estimer le potentiel de séquestration de carbone par les toits verts, les murs végétaux ainsi que par les arbres en milieu urbain.

Le sixième chapitre porte sur l'effet d'entraînement que peut jouer la séquestration de carbone, par le biais du verdissement urbain, dans la lutte contre les changements climatiques. Notamment, l'on s'y intéresse aux aspects psychologiques que peut procurer la végétation en milieu urbain dans le mode de vie des citoyens.

Finalement, le septième chapitre consiste à émettre des recommandations visant à promouvoir la séquestration naturelle de carbone notamment par les toits verts, les murs végétaux ainsi que par les arbres en milieu urbain.

## **1. LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

À l'ère de la transition vers une société sobre en carbone, le Québec fait face à des défis de taille pour combattre les changements climatiques. Leader en matière de lutte contre les changements climatiques, le Québec s'est doté d'objectifs ambitieux de réduction de GES. Ce présent essai s'insère dans une période où les changements climatiques bouleversent sérieusement la planète en ce XXI<sup>e</sup> siècle et au moment où le gouvernement du Québec affiche une grande volonté politique en matière de lutte contre les changements climatiques.

Catherine McKenna, ministre canadienne de l'Environnement et du Changement climatique, affirme que « la lutte contre les changements climatiques est l'un des plus grands défis de notre génération » (Gouvernement du Canada, 2016). Les conséquences occasionnées par les changements climatiques représentent des menaces sérieuses pour la santé, l'économie et l'environnement. L'urgence d'agir pour remédier à la problématique se fait sentir à travers tous les acteurs de la société; des citoyens au gouvernement en passant par les municipalités. À l'approche du point d'irréversibilité de la situation de réchauffement planétaire, le GIEC avertit que si la courbe de la tendance ne s'infléchit pas, le réchauffement climatique risque de franchir le cap des 4 °C d'ici la fin du siècle avec des conséquences d'une gravité sans précédent à l'échelle planétaire (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2015). Les bouleversements climatiques de la planète Terre deviennent de plus en plus inquiétants et les conséquences se font déjà sentir sur toutes les parties du monde (MDDELCC, 2012). Dans cette optique, il devient urgent d'agir afin d'assurer un bon niveau de qualité de vie à nos enfants et à celles des générations futures. En cette période cruciale de transition vers une société durable qui tient compte de l'environnement, chaque décision peut avoir un impact sur les générations qui nous suivront. Les objectifs de réduction de gaz à effet de serre témoignent de l'engagement durable du gouvernement envers sa population.

### **1.1 La COP21**

La communauté internationale s'est entendue pour limiter la hausse de la température en deçà de 2 °C lors de la vingt-et-unième session de la Conférence des Parties (COP21). En effet, l'Accord de Paris vise à contenir

« l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, étant entendu que cela



réduirait sensiblement les risques et les effets des changements climatiques » (Nations Unies, 2015).

Cependant, selon un rapport de la Banque Mondiale intitulé *Turn Down the Heat : Confronting the New Climate Normal (Vol. 2)*, la limitation de la hausse du réchauffement de la température de 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle d'ici 2050 semble être difficilement atteignable, et ce, même si des actions de mitigations ambitieuses sont entreprises (Adams et al., 2014). En effet, cela est dû au fait que les émissions de gaz à effet de serre ayant déjà été émis dans l'atmosphère se feront ressentir dans les années à venir. Les émissions de GES déjà produites à elles seules pourraient, selon ce rapport, être suffisantes pour élever la température à près de 1,5 °C, comme l'affirme Jim Yong Kim, président du Groupe de la Banque mondiale :

« les émissions passées ont tracé une trajectoire inéluctable de réchauffement pour les deux prochaines décennies, qui va surtout affecter les populations les plus pauvres et les plus vulnérables du monde » (Banque Mondiale, 2014).

En parallèle, le tableau suivant présente l'étude effectuée par le GIEC concernant l'évaluation de la probabilité d'atteindre ou pas la cible de 1,5 °C notamment.

**Tableau 1.1 Probabilité de réchauffement climatique selon différents scénarios** (tiré de : GIEC, 2014, p. 23)

Concentrations en $\text{eqCO}_2$ en 2100 [ppm $\text{eqCO}_2$ ] <sup>f</sup> Désignation de la catégorie (plage de concentration)	Sous-catégories	Sous-catégorie <sup>d</sup>	Changement des émissions en $\text{eqCO}_2$ à comparer à 2010 [%] <sup>c</sup>		Probabilité de ne pas dépasser au cours du XXI <sup>e</sup> siècle la hausse de température indiquée (par rapport à 1850-1900) <sup>d,e</sup>			
			2050	2100	1.5°C	2°C	3°C	4°C
<430	Des niveaux inférieurs à 430 ppm $\text{eqCO}_2$ n'ont été pris en compte que dans un petit nombre d'études portant sur un modèle. <sup>i</sup>							
450 (430-480)	Plage complète <sup>a,g</sup>	RCP2,6	entre -72 et -41	entre -118 et -78	Plus improbable que probable	Probable	Probable	Probable
500 (480-530)	Sans dépassement de 530 ppm $\text{eqCO}_2$		entre -57 et -42	entre -107 et -73	Improbable	Plus probable qu'improbable		
	Avec dépassement de 530 ppm $\text{eqCO}_2$		entre -55 et -25	entre -114 et -90		À peu près aussi probable qu'improbable		
550 (530-580)	Sans dépassement de 580 ppm $\text{eqCO}_2$		entre -47 et -19	entre -81 et -59		Plus improbable que probable <sup>i</sup>		
	Avec dépassement de 580 ppm $\text{eqCO}_2$		entre -16 et 7	entre -183 et -86				
(580-650)	Plage complète	RCP4,5	entre -38 et 24	entre -134 et -50		Improbable	Plus probable qu'improbable	
(650-720)	Plage complète		entre -11 et 17	entre -54 et -21				
(720-1 000) <sup>h</sup>	Plage complète	RCP6,0	entre 18 et 54	entre -7 et 72		Improbable <sup>h</sup>	Plus improbable que probable	
>1 000 <sup>h</sup>	Plage complète	RCP8,5	entre 52 et 95	entre 74 et 178		Improbable <sup>h</sup>	Improbable	Plus improbable que probable

Selon cette figure, le GIEC évalue la probabilité de ne pas dépasser une hausse de température de 1,5 °C d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle à « plus improbable que probable » (GIEC, 2014), dans un scénario où la concentration équivalente de CO<sub>2</sub> est contenue à environ 450 ppm au courant de ce siècle. Notons au passage que nous nous situons aux alentours de cette plage actuellement. En effet, le National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2016) rapporte que la moyenne de la concentration de CO<sub>2</sub> en février 2016 est de 402,59 ppm. Également, cette organisation rapporte que la valeur de la concentration de dioxyde de carbone équivalent (CO<sub>2eq</sub>) s'élève à 485 ppm en 2015 (NOAA, 2016), ce qui est légèrement supérieure à la valeur du 450 ppm de CO<sub>2eq</sub> utilisée dans le scénario. La concentration totale équivalente de CO<sub>2</sub> (ou CO<sub>2eq</sub>) s'obtient en ajoutant la contribution de réchauffement des autres gaz à effet de serre à la contribution du réchauffement du CO<sub>2</sub>. Puisque les risques associés au réchauffement climatique sont en lien avec l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (GIEC, 2014), le scénario en question semble être optimiste, quoique toujours possible, dans une optique où il faudrait être en mesure de stabiliser la quantité d'accumulation totale de CO<sub>2</sub> dans le réservoir atmosphérique d'ici les prochaines années si l'on veut pouvoir rester dans ce scénario.

Ainsi, on peut se questionner sur comment il serait possible de limiter le réchauffement de la température à 1,5 °C tel que convenu par les instances étatiques du monde entier. En se basant, sur les informations présentées précédemment, lesquelles s'appuient sur les informations que nous fournit la Banque Mondiale ainsi que le dernier rapport du GIEC, il semble que l'objectif du 1,5 °C soit difficilement atteignable à première vue dans le sens où l'on est peut-être condamné à léguer aux générations futures une planète plus chaude que nature. Toutefois, la bataille n'est pas terminée et si l'on parvient à absorber suffisamment de GES dans l'atmosphère en combinaison avec les diverses mesures de réduction des émissions, il y a là un réel espoir que l'on puisse parvenir à limiter la hausse de la température à 2 °C et peut-être même le limiter à 1,5 °C. Dans cet esprit, la séquestration de carbone s'avère être une solution incontournable qui mérite que l'on s'y attarde davantage.

## **1.2 Les objectifs ambitieux de réduction de GES du Québec**

Chef de file en matière de lutte contre les changements climatiques au Canada, le Québec s'est doté des objectifs de réduction de GES parmi les plus ambitieux au Canada et en Amérique du Nord, soit des cibles de réduction de 20 % d'ici 2020, de 37,5 % d'ici 2030 et d'au moins 80 % d'ici 2050 par rapport à l'année de référence 1990 (MDDELCC, 2015). Le premier ministre du Québec, M. Philippe Couillard, considère la cible de réduction des GES d'ici 2030 comme étant ambitieuse parce que « ce qui était facile à réaliser a été réalisé. Donc, devant nous, c'est très exigeant » a-t-il déclaré lors d'une entrevue réalisée dans le cadre de l'émission « Les coulisses du pouvoir » (ICI Radio-Canada, 2015). Cet essai s'inscrit au cœur des

préoccupations en matière de lutte contre les changements climatiques dans un esprit voulant documenter des pistes de solutions, en l'occurrence, par la séquestration de carbone en milieu urbain, de façon à contribuer à augmenter les chances d'atteindre les objectifs de réduction des GES du gouvernement du Québec et de favoriser une transition vers une société sobre en carbone.

### **1.3 L'urbanisation**

L'urbanisation a sans cesse continué de croître à un rythme effréné depuis les dernières décennies (Ferland, 2015). Ce phénomène caractérisé par une forte densité de la population engendre des pressions sur les écosystèmes naturels. L'appauvrissement de la biodiversité des écosystèmes en zone urbaine rend ce milieu peu résilient en regard à sa capacité d'emmagasiner le carbone dans la biomasse. Or, l'un des services écosystémiques de plus en plus mis en valeur pour la lutte contre les changements climatiques est la séquestration de carbone dans la biomasse (Davies, Edmondson, Heinemeyer, Leake, Gaston, 2011). Bien que l'on entende souvent parler des stratégies de réductions d'émissions de GES en matière de lutte contre les changements climatiques, la séquestration de carbone demeure néanmoins un élément incontournable dans cette lutte pour protéger la qualité des écosystèmes afin que les générations futures puissent en profiter de façon pérenne.

### **1.4 Cadre d'insertion de cet essai**

Devant les grands défis à réaliser en matière de réduction de gaz à effet de serre pour que le Québec puisse respecter ses engagements dans sa lutte contre les changements climatiques, il est nécessaire que le Québec prenne en considération toutes les opportunités qui s'offrent à lui pour atteindre les cibles ambitieuses de réduction de GES qu'il s'est fixé. C'est au cœur de cette thématique que cet essai s'inscrit dans une optique visant à favoriser une augmentation de la séquestration de carbone en milieu urbain — une pratique encore peu développée qui connaît cependant une popularité grandissante dans certaines villes du Québec, du Canada et à l'international. Cet essai s'insère également au moment où le gouvernement du Canada veut entendre toutes les idées et les propositions des citoyens et des organismes en matière de lutte contre les changements climatiques, c'est-à-dire en matière de réduction de GES (Gouvernement du Canada, 2016). En fait, le gouvernement fédéral effectue présentement des consultations publiques en donnant « la parole » au public pour élaborer l'approche du Canada face aux changements climatiques parce que « le gouvernement ne peut pas régler seul le problème des changements climatiques » (Gouvernement du Canada, 2016). Cet essai pourrait éventuellement servir à alimenter des discussions en matière de lutte contre les changements dans la démarche du gouvernement face aux changements climatiques.

Qui plus est, cet essai s'insère dans une perspective visant à favoriser un changement de comportement sociétal intégrant mieux l'environnement d'où la raison pour laquelle l'auteur de l'essai a voulu cibler son sujet dans un milieu urbain. À l'heure actuelle, plus de 50 % de la population mondiale habite dans un milieu urbain et cette proportion devrait frôler les 70 % d'ici 2050 (Nations Unies, 2014b). Au Canada, c'est plus de 80 % de la population qui habite en milieu urbain (Banque Mondiale, 2016). Si les pressions environnementales sont surtout associées aux milieux urbanisés, les solutions s'y trouvent également. Ainsi, la séquestration de carbone en milieu urbain s'avère être un facteur permettant de mieux mettre en contact les humains avec la nature. Cela pourrait avoir une influence positive quant à l'adoption de comportements sociétaux écoresponsables. Cette observation sera traitée au chapitre 6 portant sur les effets d'entraînements.

## **2. LA SÉQUESTRATION DE CARBONE**

Ce deuxième chapitre s'intéresse, dans un premier temps, au caractère international que revêt le rôle de la séquestration de carbone dans la lutte contre les changements climatiques. À cet effet, l'on verra que la séquestration de carbone est une vectrice clef reconnue par les communautés internationales comme moyen de lutte contre les changements climatiques. Dans un deuxième temps, l'on verra, un peu plus en détail, en quoi consiste la séquestration de carbone et pourquoi il est intéressant de s'y intéresser en milieu urbain. Finalement, ce chapitre prendra fin par une description plus attentivement de la forme naturelle de la séquestration de carbone ainsi que le cycle de celui-ci.

### **2.1 Quelques traités ou conventions internationaux incorporant la séquestration de carbone**

Le sujet des changements climatiques a fait l'objet d'importantes discussions regroupant plusieurs instances gouvernementales autour d'une table. Les parties qui suivent aborderont quelques traités ou conventions internationaux, tels le Protocole de Kyoto et la COP21 lesquels soulignent l'importance que joue la séquestration de carbone dans la lutte contre les changements climatiques.

#### **2.1.1 Le Protocole de Kyoto**

La séquestration de carbone fait partie des solutions, relevant des initiatives de coopération internationale, pour lutter contre les changements climatiques. Déjà, le Protocole de Kyoto en 1997 considérait la séquestration de carbone comme une voie pour riposter contre le réchauffement planétaire (Beaudoin, s. d.). En effet, le Protocole de Kyoto prend en compte l'absorption des GES par les puits et les réservoirs, selon les engagements conclus par les différentes Parties dans le cadre de ce protocole en lien avec la réduction de gaz à effet de serre (Nations Unies, 2014). Dans le même ordre d'idées, le Protocole de Kyoto a recours à des calculs normalisés ou standardisés en matière d'estimations d'absorption de gaz à effet de serre dans le calcul du bilan de GES par une méthodologie précise élaborée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Nations Unies, 2014).

#### **2.1.2 L'Accord de Paris**

Plus récemment, la vingt-et-unième session de la Conférence des Parties, en 2015, a une fois de plus exposé la séquestration de carbone comme une façon permettant de lutter contre le déséquilibre de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. En effet, les Parties signataires de l'Accord de Paris reconnaissent l'importance de la conservation et du renforcement des puits et réservoirs de GES face à la problématique du réchauffement climatique (Nations Unies, 2015). En fait, dans le but d'atteindre

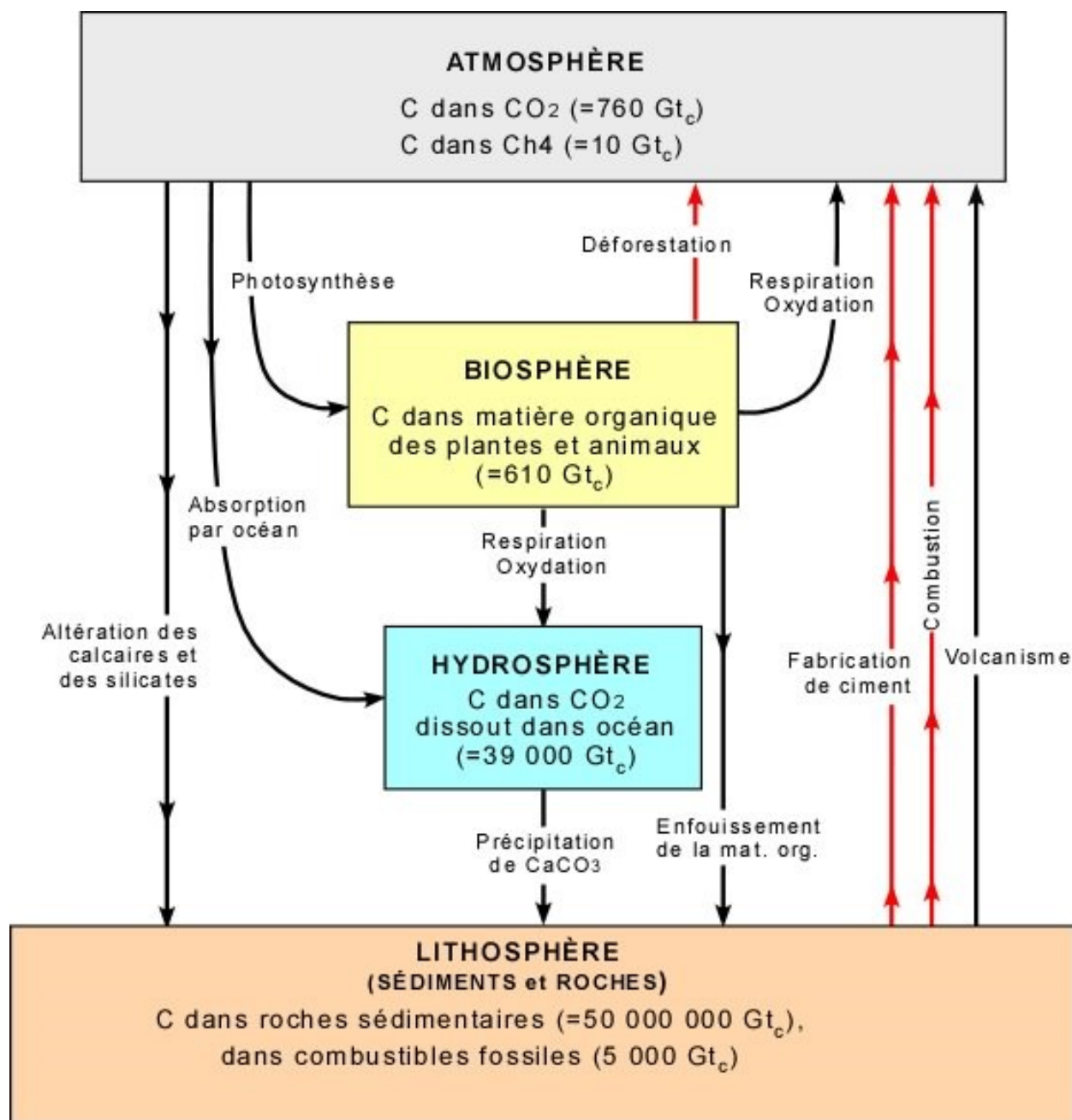
les objectifs de limitation du réchauffement climatique convenus par les Parties, le texte de l'Accord de Paris affirme qu'il faut :

« parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle, sur la base de l'équité, et dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté » (Nations Unies, 2015).

Il appert que la communauté internationale reconnaît explicitement — dans les écrits des traités internationaux — l'importance du rôle que joue l'absorption du carbone, c'est-à-dire la séquestration de carbone dans la lutte contre les changements climatiques. Dans la pratique, il est possible de constater que la séquestration de carbone dans les villes devient de plus en plus populaire, et ce, de manière directe ou indirecte. À titre d'exemple, les municipalités peuvent avoir recours à des mesures de verdissement comme l'utilisation de toits verts afin de lutter contre un problème d'îlots de chaleur. Ainsi, plusieurs initiatives vertes entreprises par les villes et les municipalités s'inscrivent dans une optique de séquestration de carbone, même si parfois cela ne constitue pas le but premier du projet.

## **2.2 En quoi consiste la séquestration de carbone?**

La littérature évoque la séquestration de carbone sous deux angles principaux. D'une part, la séquestration de carbone fait appel à des processus naturels biologiques qui permettent de transférer le flux de carbone depuis l'atmosphère à la biosphère par photosynthèse et dans l'océan par échange physico-chimique où le CO<sub>2</sub> atmosphérique se dissout lentement dans l'hydrosphère. (CNRS, 2006). La figure suivante montre les différents flux ou échanges de carbone entre les différents réservoirs de carbone dans le cycle global du carbone.



Valeurs en Gt<sub>c</sub> (gigatonnes de carbone),  
selon Berner et Berner (1996);  
Kump, Kasting et Crane (1999) Prentice Hall

Figure 2.1 Le cycle global du carbone (tiré de Bourque, 2010)

D'autre part, le captage et la séquestration de carbone (CSC) peuvent aussi être réalisés par des techniques d'enfouissement artificiel relevant des méthodes d'ingénieries. La CSC vise principalement à capter à la source les émissions de carbone, puis à les injecter dans les profondeurs des réserves géologiques (CO<sub>2</sub> Solutions, 2016). Cette seconde forme de séquestration des émissions anthropiques ne sera pas abordée dans le cadre de cet essai étant donné que ce présent travail s'intéresse davantage au mode de séquestration dite naturelle faisant entre autres appel au processus de la photosynthèse pour séquestrer le carbone dans la biomasse. C'est de ce type de séquestration dont il sera question tout au long de l'essai.

### **2.3 La séquestration naturelle de carbone**

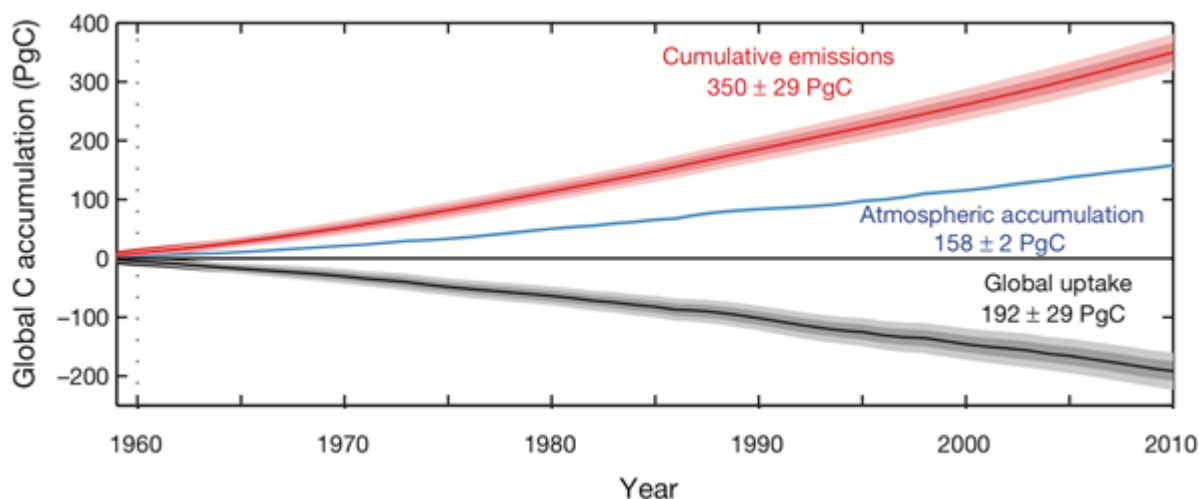
La séquestration naturelle de carbone consiste à « absorber » ou à « emmagasiner » le carbone dans un puits ou un réservoir de carbone à long terme. Comme il est possible de le constater dans la figure 2.1, il existe quatre grands réservoirs de carbone, soit l'atmosphère, la biosphère, l'océan ou l'hydrosphère ainsi que le sous-sol ou la lithosphère. Dans l'atmosphère, le carbone est présent sous forme gazeuse dans la molécule du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). En regard à la biosphère, le carbone est stocké sous forme de matière organique notamment dans le bois. L'hydrosphère renferme le carbone inorganique sous forme de calcaire ainsi que sous forme de CO<sub>2</sub> dissout (Bourque, 2010). La lithosphère renferme également du carbone sous forme de roches, de sédiments et de combustibles fossiles (ConsoGlobe, 2014). La circulation du carbone entre les différents réservoirs est assurée par le cycle du carbone.

#### **2.3.1 Le cycle du carbone**

Le cycle naturel du carbone consiste à un équilibre dynamique entre les émissions et l'absorption de carbone entre les différents réservoirs de celui-ci (Centre national de la recherche scientifique [CNRS], 2006). Cependant, depuis la révolution industrielle, la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère a été grandement affectée. Cela s'explique par le fait que la moitié des émissions de GES, liées aux activités de l'Homme, s'est emmagasinée dans le réservoir atmosphérique depuis l'ère préindustrielle (ConsoGlobe, 2014). L'ironie étant que la réserve de carbone atmosphérique (~ 800 Gt) est de loin inférieure aux réserves de carbone contenu dans l'hydrosphère (~ 40 000 Gt), mais que le rythme auquel le carbone s'accumule dans l'atmosphère, depuis l'invention de la machine à vapeur est le plus élevé de tous les réservoirs! En effet, la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a augmenté d'environ 45 % depuis la moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle passant de 278 ppm à plus de 400 ppm aujourd'hui, laquelle est due par une accumulation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère provoquée par les émissions anthropiques. La moitié de cette augmentation s'est produite durant les cinquante dernières années (Climate Challenge, 2013).

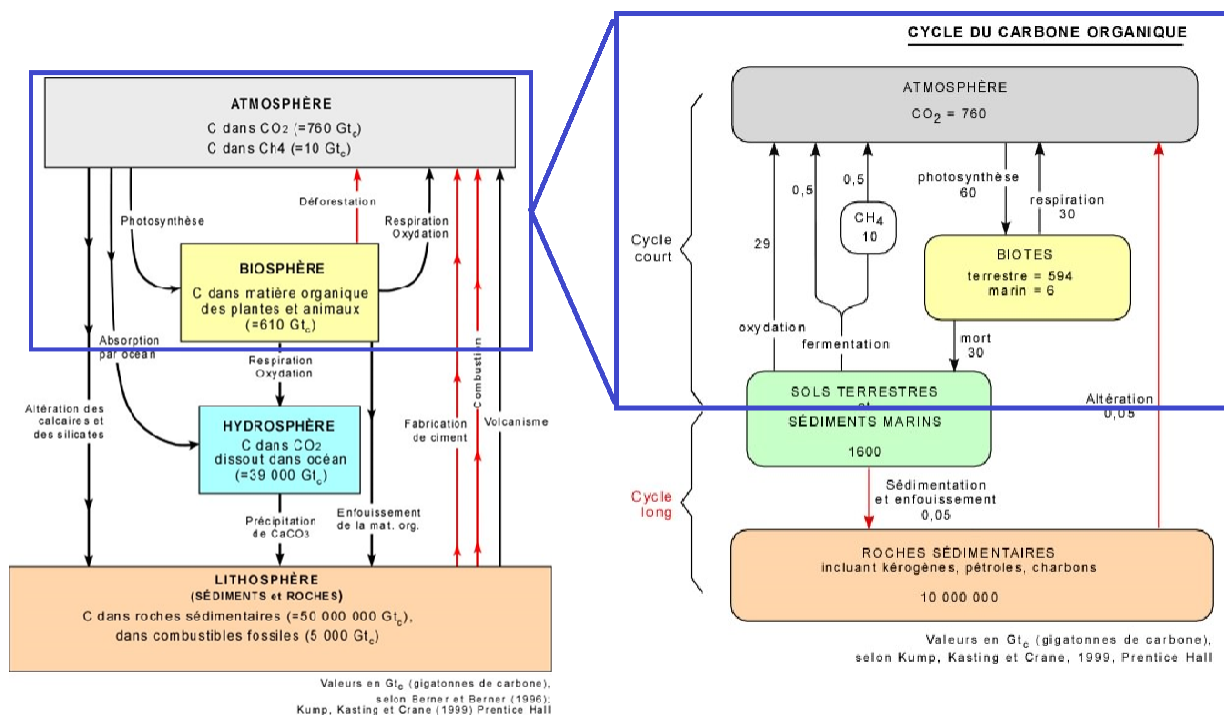


Dernièrement, les activités anthropiques ont émis 35,7 GT de CO<sub>2</sub> en 2015 (Janssens-Maenhout G., Muntean M., Peters J., Olivier J., 2015). À titre de conversion comparative, la masse molaire du carbone dans le CO<sub>2</sub> représente douze quarante-quatrièmes (12/44) du dioxyde de carbone. Cela signifie que près de 10 GT (9,7 GT) de carbone ont été émis dans l'atmosphère en 2015. Alors que l'Homme rejette de plus en plus de carbone dans l'atmosphère, la Terre essaie tant bien que mal de régulariser la situation. Les écosystèmes de la Terre travaillent en synergie pour tenter de régulariser le dérèglement de la hausse de la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. En effet, la capacité de séquestration de carbone par les écosystèmes planétaires augmenterait au fur et à mesure que les émissions de carbone augmentent selon un rapport écrit par des chercheurs de l'Université du Colorado (Alden, Ballantyne, Miller, Tans, White, 2012). La figure ci-dessous montre ce phénomène naturel visant à balancer le surplus de CO<sub>2</sub>.



**Figure 2.2 Accumulation et absorption de carbone atmosphérique** (tiré d'Alden et al., 2012)

Selon cette figure, l'on peut remarquer que plus les émissions accumulées de CO<sub>2</sub> augmentent dans l'atmosphère, plus la réponse des puits de carbone planétaire est grande. L'absorption globale de carbone par les puits de carbone océaniques et terrestres est passée de 2,4 GT à 5 GT entre 1960 et 2010 (Alden et al., 2012). La tendance de séquestration par les puits et réservoirs de carbone est telle que la Terre en absorbe environ la moitié de ce qui est émis. Ainsi, il est estimé que les puits de carbone terrestre et océanique absorbent environ 5 GT de carbone annuellement (Alden et al., 2012). Ainsi, en 2015, près de 5 GT (4,7 GT) de dioxyde de carbone se sont ajoutés dans le réservoir atmosphérique. Cette accumulation, augmentant la concentration de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère d'année en année, perturbe le cycle naturel du carbone et est à l'origine des problèmes largement médiatisés en regard au réchauffement climatique. La figure ci-dessous montre les interactions du cycle du carbone affecté par les activités anthropiques.



**Figure 2.3 Le cycle global du carbone et son cycle organique (compilation d'après Bourque, 2010)**

La partie encadrée montre les parties du cycle de carbone auquel cet essai s'intéresse, c'est-à-dire en relation avec la séquestration de carbone en milieu urbain. En fait, lorsque l'on parle de la séquestration de carbone en milieu urbain, cela est relatif au cycle court du cycle de carbone organique. La figure 2.2 ci-dessus montre la photosynthèse comme étant le processus par lequel le flux du carbone transite de l'atmosphère à la biomasse biotique. Le carbone peut retourner dans l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub> ou sous forme de CH<sub>4</sub> par des processus d'oxydation, de fermentation ou par la respiration.

## 2.4 La séquestration naturelle de carbone en milieu urbain

Comme il en a été mentionné plus haut, ce travail s'intéresse à la séquestration de carbone en milieu urbain, et ce, particulièrement dans la biomasse. Rappelons que l'un des objectifs de ce travail est d'estimer le potentiel de séquestration de carbone en milieu urbain, et ce, à l'échelle du Québec. Une revue de la littérature a permis de constater que les initiatives de séquestration de carbone en milieu urbain

peut se manifester sous diverses formes, lesquelles peuvent se résumer par des projets de verdissement essentiellement axés sur la plantation d'arbres, mais également en lien avec l'horticulture ornementale.

En milieu urbain, le carbone peut être séquestré sous diverses formes. Les travaux de séquestration de carbone en milieu urbain sont principalement axés sur la plantation d'arbres. En outre, les études visant à déterminer le taux de séquestration de carbone d'une ville urbaine n'ont porté essentiellement que sur l'apport de séquestration des arbres urbains.

#### **2.4.1 Quelques études sur la séquestration de carbone en milieu urbain dans le monde**

La ville de Leicester a été choisie par des chercheurs afin d'évaluer le stock de carbone au-dessus du sol en milieu urbain en raison de sa taille représentative d'une ville typique du Royaume-Uni. Cette ville, comptant environ 300 000 habitants, possède une flore renfermant plus de 200 000 tonnes de carbone sur une superficie d'environ 73 km<sup>2</sup> selon cette étude. La densité de carbone au-dessus de la surface du sol représente un peu plus de trois kilogrammes par mètre carré. La grande majorité du stock de carbone séquestré, soit à 97 %, est associé aux arbres. Le reste étant associé aux herbacés et aux petits arbustes. Les chercheurs de l'étude suggèrent que la séquestration de carbone en milieu urbain a été, jusque-là, largement sous-estimée et que cette étude révèle l'importance de considérer et d'évaluer le stock de carbone ainsi que sa séquestration en milieu urbain (Davies, Edmondson, Heinemeyer, Leake et Gaston, 2011).

D'autre part, les engagements de la Nouvelle-Zélande en rapport avec que le protocole de Kyoto a suscité un intérêt grandissant de ce pays à planter encore plus d'arbres pour réduire leurs émissions nettes de carbone. En Nouvelle-Zélande les forêts plantées sont au coeur de la comptabilité des GES et l'absorption de CO<sub>2</sub> est calculée eu égard à la croissance des forêts plantées (Organisation de coopération et de développement économique [OCDE], 2007). Le rythme de la plantation forestière en Nouvelle-Zélande s'est fait au rythme de plus de 400 km<sup>2</sup> par an en moyenne depuis 1990. Parmi les forêts plantées environ 7 000 km<sup>2</sup> sont qualifiés de « forêts de Kyoto » pour souligner l'influence du protocole de Kyoto dans la plantation d'arbres. Les pins de Monterey, occupant 90 % de la forêt du pays, permettent d'absorber 26 tonnes de CO<sub>2</sub> par hectare annuellement. Toutefois, la récolte forestière des forêts de Kyoto prévu à partir de 2019, une fois que les pins arrivent à maturité, est susceptible de modifier le rôle de puits net de carbone que jouent les forêts dans ce pays (OCDE, 2007).

En Chine, la ville de Hangzhou a fait l'objet d'une étude urbaine visant à quantifier le stock de carbone et la séquestration de carbone en comparaison avec les émissions carboniques provenant de la consommation

d'énergie fossile issue des activités industrielles de cette ville. Le bilan de l'étude est tel que la forêt urbaine de Hangzhou représente un réservoir de carbone de près de 12 TgC, soit l'équivalent d'environ 30 tonnes par hectare. En ce qui a trait à la séquestration de carbone, cette forêt urbaine séquestre 1,7 tonne de carbone par hectare par année pour un total de plus de 1,3 million de tonnes de carbone par année. Cela représente près de 20 % des émissions industrielles de la ville. L'étude souligne également que le taux de séquestration de carbone pourrait même être augmenté si l'on mettait en place des pratiques de gestion adaptée plus durable de la forêt urbaine (Zhao, Kong, Escobedo et Gao, 2010). Une autre étude similaire a été effectuée à Shenyang, une ville très industrialisée au nord de la Chine ayant peu de superficies forestières. L'étude effectuée dans la ville de Shenyang a permis d'estimer que la séquestration de carbone urbaine par les arbres permet de compenser 0,26 % des émissions annuelles de carbone de Shenyang (Liu et Li, 2011).

Dans la même optique, des études similaires ont également été faites aux États-Unis notamment à Miami-Dade et à Gainesville. Les études relativement à la séquestration de carbone urbaine ont permis d'estimer que les forêts urbaines de Gainesville et de Miami-Dade permettent de compenser les émissions carboniques que partiellement, soit de 1,8 % et 3,4 % respectivement pour les deux villes. Qui plus est, les auteurs de l'étude soulèvent l'importance de préserver les forêts existantes dans un souci d'atténuation des changements climatiques (Escobedo, Varel, Zhao, Wagner, et Zipperer, 2010). Toujours aux États-Unis, une étude effectuée par Nowak et Crane (2002) a permis d'estimer le stock de carbone ainsi que la séquestration de carbone dans les milieux urbains aux États-Unis. Nowak et Crane (2002), en se basant sur les données de dix villes états-uniennes combinées avec les données disponibles du couvert forestier national urbain, ont pu estimer que les arbres urbains à l'intérieur du territoire des États-Unis stockent 700 millions de tonnes de carbone avec un taux de séquestration de près de 23 millions de tonnes de carbone par année. La densité de carbone moyenne des forêts urbaines à l'échelle nationale est d'environ 25 tonnes / hectare, ce qui équivaut à environ la moitié de la densité carbone d'un peuplement forestier (Nowak et Crane, 2002).

Au Canada, une étude a également été effectuée pour évaluer le stock et le taux de séquestration de carbone par les forêts en zone urbaine. Selon Pasher, McGovern, Khoury et Duffe (2014), les services écosystémiques rendus par les forêts urbaines ont un impact significatif sur la qualité de vie des millions de Canadiens malgré la faible superficie occupée par les forêts urbaines. En effet, seulement une petite fraction de la superficie du territoire à l'échelle canadienne est considérée comme étant urbaine, soit 0,26 % ou 24 200 km<sup>2</sup>. À titre comparatif, le pourcentage de la superficie urbaine est estimé à trois et cinq pour cent pour les territoires états-uniens et européens respectivement. L'étude de Pasher et al. (2014) a

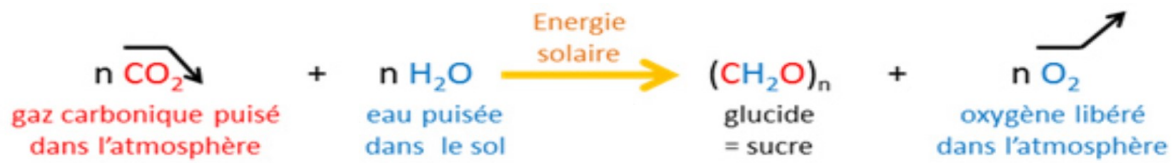
permis d'estimer avec une plus grande précision, par l'analyse d'images hautes résolutions notamment, le stock de carbone ainsi que le taux de séquestration en milieu urbanisé au Canada. L'étude consistait globalement à estimer, par l'analyse d'images hautes résolutions, le pourcentage de canopée des arbres urbains ou en anglais le *Urban Tree Canopy (UTC)*. Une fois l'UTC connu, il suffit d'appliquer des formules pour déterminer le stock de carbone ainsi que le taux de séquestration. Les détails de ces calculs seront présentés plus en détail au chapitre 5 portant sur les estimations du potentiel de séquestration de carbone. Le Canada possède ainsi un UTC de 27 % et les arbres urbains canadiens stockent près de 34 millions de tonnes de carbone à un taux de séquestration d'environ 2,5 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par année (Pasher et al., 2014).

Au niveau plus local, plusieurs initiatives et organismes effectuent des projets qui permettent d'augmenter le niveau de séquestration dans une ville urbaine. Par exemple à Montréal, l'on peut souligner, en matière de séquestration de carbone, la société de verdissement du Montréal métropolitain (SOVERDI), Sentier Urbain de même que la campagne Verdir du centre régional de l'environnement (CRE) de Montréal pour ne nommer que ceux-là. SOVERDI est chef de file en matière de verdissement et possède comme mission de verdir le paysage montréalais (SOVERDI, s. d). Sentier Urbain est aussi un acteur à Montréal qui préconise le verdissement en tant que stratégie écosystémique visant à augmenter la végétation urbaine de la ville et à le préserver (Sentier Urbain, 2016). La campagne Verdir de la ville de Montréal vise à atteindre les objectifs de la ville quant aux espaces verts en promouvant le verdissement et la biodiversité urbaine dans la métropole.

Somme toute, le verdissement urbain, par le processus de la photosynthèse, apparaît comme étant l'approche préconisée pour favoriser la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain.

#### **2.4.2 La photosynthèse**

Les plantes, les arbres et la végétation contribuent à absorber une partie du CO<sub>2</sub> atmosphérique sous forme de carbone organique. Cela se produit lors du processus de la photosynthèse, laquelle implique la formule simplifiée générale suivante:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{énergie solaire} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$  (Bourque, 2010). La figure suivante montre un peu plus en détail le processus de la réaction chimique de la photosynthèse :



**Figure 2.4 Équation globale de la photosynthèse** (tiré de : Botarela, 2012)

Le processus de la photosynthèse convertit le carbone inorganique de l'atmosphère et l'emmagasine dans la biomasse. La formule  $\text{CH}_2\text{O}$  n'est qu'une représentation simplifiée de la biomasse. Celle-ci contient en réalité des chaînes d'atomes beaucoup plus grandes (Bourque, 2010). Une partie du carbone stocké peut cependant être libéré à nouveau dans l'atmosphère lorsqu'un arbre meurt et se décompose par exemple.

### **3. LE VERDISSEMENT URBAIN**

Ce chapitre exposera les différentes techniques de verdissement urbain. Dans un premier temps, cela concernera la végétalisation du bâti, c'est-à-dire l'utilisation des toits verts et des murs végétaux pour verdir l'espace urbain. Puis, la thématique des arbres urbains sera également abordée comme technique de verdissement urbain permettant de séquestrer le CO<sub>2</sub> en contexte urbain. Pour chacune d'elles, une présentation de ces techniques sera effectuée avant de procéder à une analyse des conditions favorisant la séquestration de carbone. Finalement, une analyse de faisabilité économique sera effectuée pour chacune des techniques de verdissement urbain présentées.

#### **3.1 Toits verts**

L'imagination humaine d'une architecture plus verte a donné naissance aux toits verts au courant du VIII<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ connus sous le nom des Jardins de Babylone (Castonguay, 2013). Aujourd'hui, les toitures végétales sont surtout connues pour leurs vertus relativement aux îlots de chaleur et en ce qui concerne la gestion des eaux pluviales (Boucher, 2006). Dans cette section, les toits verts feront l'objet d'une présentation et l'on tentera d'y déterminer les conditions optimales de séquestration de carbone. Finalement, une analyse économique des toits verts sera également effectuée afin d'évaluer la faisabilité de l'implantation des toits verts au Québec.

##### **3.1.1 Présentation des toits verts**

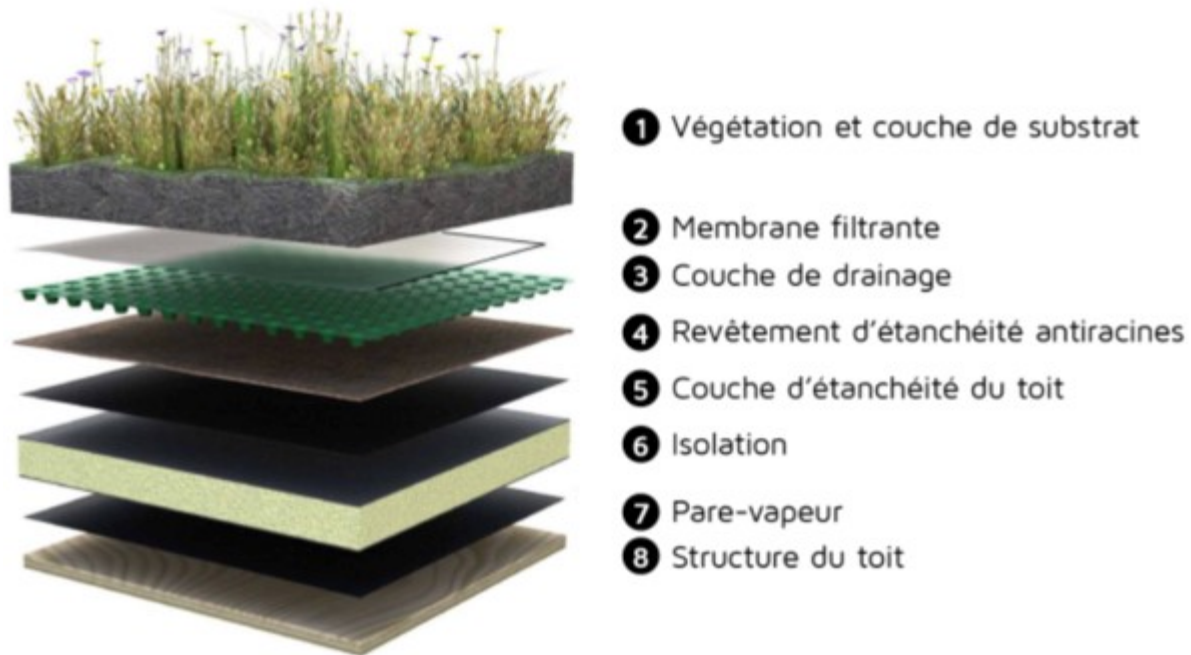
Bien que l'idée de mettre de la verdure sur les toits date depuis très longtemps, ce n'est qu'au XX<sup>e</sup> siècle que les architectes ont fait appel à des techniques pour verdir les toits. Depuis et avec la dégradation de l'environnement qui se fait sentir à partir des années soixante, la popularité des toits verts est de plus en plus grandissante. L'Allemagne est devenue pionnière en matière des toits verts par la mise en place notamment de subventions municipales visant à favoriser le verdissement des toits verts (Boulay, 2006). Plus de dix pour cent des toits de ce pays sont constitués de toits verts (Yeung, 2014). Au Québec, les toits verts commencent à se développer timidement (Boulay, 2006). À Montréal, le potentiel de verdissement des toits semble être grand puisque cette ville — également surnommée le « royaume des toits plats » — dispose de près de 200 000 toits plats (Bernier, 2011b). Soulignons également, au passage, que le tiers de la superficie du Plateau Mont-Royal est couverte par les toits de bâtiments et que 80 % de la ville est recouverte de surface imperméable (Vergliete et Labrecque, 2007). Les toitures plates constituent un des principaux facteurs facilitant l'implantation des toits verts. Il faut évidemment aussi s'assurer que la structure soit assez solide pour supporter non seulement la verdure au-dessus du toit, mais aussi le poids du substrat permettant la croissance des végétaux.

Reconnus par la certification *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) pour ses caractéristiques d'efficacité énergétique, les toits verts sont souvent associés aux avantages qu'ils procurent dans la gestion des eaux pluviales de même qu'au niveau de la régulation thermique pour lutter contre les îlots de chaleurs urbains. En outre, l'on apprécie la verdure des toits verts, car elle améliore l'esthétique du paysage urbain en projetant une vue plus agréable sur les toits des édifices, laquelle profite surtout aux citoyens haut perchés.

Outre ces vertus, lorsque l'on parle de végétation ou de verdissement, la notion de la séquestration de carbone y est liée puisque cela est en lien avec le processus de la photosynthèse. Les toits verts n'échappent pas à cela. C'est pourquoi il devient intéressant, dans le cadre de cet essai, d'estimer le potentiel de séquestration de carbone par les toits verts au Québec. Cela sera traité dans la section traitant de l'estimation du potentiel de séquestration de carbone par les toits verts au chapitre 5.

Il existe deux types principaux de toits verts : l'intensif et l'extensif. Le toit vert intensif se caractérise par une épaisseur de substrat plus épaisse, c'est-à-dire plus grande que 20 cm, alors que le toit extensif ne requiert qu'une mince couche de substrat. Le nombre de variétés de végétation que l'on peut planter est cependant plus limité pour un toit extensif. Sur une toiture verte intensive, il est possible de planter une quantité quasiment illimitée d'espèces végétales (Pereira, 2008). Étant donné le coût élevé d'une toiture intensive et que sa mise en place requiert une structure renforcée, son installation nécessite que l'on y pense dès la conception du bâtiment. Autrement, la technologie extensive ou semi-intensive sera privilégiée lorsque l'on veut verdir un toit existant. La figure suivante présente les principaux composants d'un toit vert.





**Figure 3.1 Les composants d'un toit vert** (tiré de : Énergide, 2016)

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques des toits verts extensifs et intensifs :

**Tableau 3.1 Caractéristiques principales des toits verts extensifs et intensifs** (compilation d'après Janpierre, 2003, p.12, Pereiri, 2008, p.9 et Dunnet et Kingsbury, 2008, p. 100 )

Toits verts	Extensifs	Intensifs
Profondeur du substrat (cm)	5 à 20	> 20
Poids (kg / m <sup>2</sup> )	80 à 150	300 à 1000 ou plus
Pente	< 45 °	< 5°
Entretien	Non	Oui
Irrigation	Non	Oui
Accessibilité	Non	Oui

Les principales différences entre une toiture végétale intensive et extensive concernent notamment le poids du toit végétal, lequel est en lien direct avec l'épaisseur du substrat utilisé. L'inconvénient principal de l'utilisation de la technologie intensive est qu'elle requiert de l'entretien de même qu'un système d'irrigation qui peut faire gonfler le prix. Une toiture extensive ne requiert habituellement pas ou peu d'entretien et ne demande pas d'avoir un système d'irrigation. L'avantage, par contre, de posséder une

toiture intensive verte est que cela permet d'avoir accès au toit à des fins récréatives. Sa conception doit donc être effectuée sur une charpente plate idéalement, contrairement aux toits verts extensifs dont l'installation est possible sur une pente allant jusqu'à 45°. L'accessibilité à des fins récréatives sur une toiture extensive n'est toutefois pas réellement envisageable compte tenu de la capacité de support du toit notamment et de la pente possible. Cependant, les toits extensifs, par la faible présence anthropique, offrent la possibilité à la biodiversité naturelle de s'installer pouvant même s'intégrer en tant que corridors verts pour différentes espèces (Janpierre, 2003). Notons également qu'un entre-deux en termes de technologies extensives et intensives peut être employé. Il s'agit des toitures semi-intensives qui possèdent l'avantage d'avoir une faible épaisseur de substrat tout en permettant une accessibilité au toit. Ce type de toit semi-intensif requiert également un système d'irrigation et des entretiens fréquents tout comme les toitures intensives.

### 3.1.2 Les conditions favorisant la séquestration

Dans le but de favoriser une séquestration de carbone accrue par les toits verts, il est primordial, dans un premier temps, de connaître les bons plantes et végétaux à planter, car il importe que ceux-ci soient adaptés à la région. Bien que la végétation à la portée d'une toiture extensive soit plutôt limitée, cela ne constitue pas un frein pour la mise en place des toits verts au Québec. En effet, les toitures végétales de type extensif offrent la possibilité de planter une végétation très résistante au climat rigoureux que connaît le territoire du Québec. Par exemple, le trèfle blanc, le thym serpolet, l'achillée mille-feuille, la fétuque, la joubarbe de même que l'orpin et la ciboulette peuvent très bien garnir les toitures extensives puisqu'ils sont adaptés à la pollution urbaine et au climat du Québec (Janpierre, 2003). De plus, les vivaces de type « sedum » sont adaptées à l'humidité et au climat québécois. Ainsi, il peut être utile de répertorier les vivaces ayant un potentiel de séquestration plus grand, lequel est lié à leur taux de croissance. Les plantes vivaces suivantes, tirées d'un guide effectué par le Centre d'écologie urbaine de Montréal (CEUM), sont à croissance rapide et ont également fait leurs preuves quant à leurs résistances en milieu urbain (CEUM, 2013) :

- Barbe de bouc (*Aruncus dioicus*)
- Aspérule odorante (*Asperula odorata*)
- Calamagrostide (*Calamagrostis sp.*)
- Coreopsis verticillé (*Coreopsis verticillata*)
- Avoine bleue (*Helictotrichon sempervirens*)
- Tournesol vivace (*Heliopsis helianthoides*)

- Hémérocalle (*Hemerocallis sp.*)
- Hosta (*Hosta sp.*)
- Lamier jaune (*Lamium galeobdolon*)
- Miscanthus (*Miscanthus sp.*)

Il est également suggéré de poser un substrat riche en agrégats poreux, soit jusqu'à 70 %, afin que l'eau soit le plus possible retenue dans les porosités du substrat (Bonhomme, 2012). Il est aussi à souligner que puisque l'utilisation d'une toiture extensive limite l'accès aux espaces verts du toit, cela rend le milieu de ce toit peu fréquenté par les humains. Ainsi, la création d'un écosystème naturel sur le toit peut en être favorisée, voire devenir un lieu de prédilection pour certaines espèces végétales sensibles ou certains oiseaux (Les Toits Vertige, 2011).

En ce qui concerne les toits utilisant la technologie intensive, ceux-ci permettent la plantation d'une grande variété de plantes allant même jusqu'à la possibilité de planter des arbres nains ou fruitiers (Sévery, 2012). Mais toujours est-il qu'il faut que ces derniers soient capables de tolérer le climat froid du Québec. En outre, une toiture intensive offre la possibilité d'effectuer de l'agriculture urbaine directement sur le toit d'un édifice (Castonguay, 2013). Cela permet de garantir la fraîcheur des fruits et légumes locaux. L'agriculture urbaine locale devient d'autant plus intéressante si l'on tient compte de la réduction des GES associée au transport des fruits et légumes sur le marché comparativement à si l'on devait importer notre consommation végétale.

Outre ces aspects techniques qui permettent de favoriser le plus de séquestration de carbone possible, il ne faut pas oublier que la mise en place d'un toit vert peut être relativement coûteuse, d'où pourquoi il est également très important de fournir des incitatifs financiers dans la construction d'un toit vert afin que les toitures végétales se multiplient plus rapidement comme cela s'est produit en Allemagne. La section suivante, portant sur les aspects économiques des toits, explicitera plus en détail les coûts relatifs à la mise en place d'une toiture verte. En outre, des mesures réglementaires obligeant les entrepreneurs à verdir une partie de leur bâtiment peuvent s'avérer efficaces. Par exemple, à Tokyo les nouvelles constructions ayant plus de 1000 mètres carrés doivent obligatoirement verdir au minimum 20 % de leur toit. (Ecohabitation, 2015).

Bref, le choix des plantes ainsi que l'utilisation des outils financiers et réglementaires permettent de favoriser la prolifération de toits verts et par conséquent d'assurer un maximum de séquestration de carbone par ceux-ci.

### 3.1.3 Faisabilité économique

Un toit vert de type intensif requiert beaucoup d'investissement initial et doit être planifié idéalement dès la conception du bâtiment puisqu'il faut une structure renforcée afin de pouvoir soutenir le poids du terreau, de l'eau ainsi que des végétaux. Le tableau suivant présente un résumé des différents coûts relatifs à l'implantation d'un toit vert dépendamment s'il est intensif ou extensif.

**Tableau 3.2 Les coûts approximatifs de l'implantation des toits verts** (compilation d'après Boucher, 2006, p.2 et Sémary, 2012)

	Toits extensifs	Toits semi-intensifs	Toits intensifs
Coûts initiaux (\$/m <sup>2</sup> )	150-200	200-400	500-3000

Le coût initial d'installation d'une toiture utilisant la technologie intensive varie de plus de 500 \$ / m<sup>2</sup> à plus de 3000 \$ / m<sup>2</sup> environ. Qui plus est, ce type de toiture nécessite un entretien considérable comme procéder à l'irrigation des eaux. Plus abordables, les toits extensifs ne nécessitent pas d'irrigation et leurs coûts d'installations se situent entre 150 \$ / m<sup>2</sup> et 200 \$ / m<sup>2</sup> environ (Boucher, 2006).

Dans la pratique, le type de toiture qui est installée consiste surtout à du semi-intensif (Hardym 2014). En réalité, le coût d'un toit vert oscillerait entre 18 \$ et 37 \$ le pied carré ou environ de 200 \$ à 400 \$ le mètre carré (Sémary, 2012).

En outre, d'autres coûts supplémentaires peuvent également venir s'ajouter à la facture puisqu'avant toute installation d'un toit vert, il est préférable de faire appel à un ingénieur afin de vérifier la solidité de la structure. La structure de support doit être apte à supporter le poids des végétaux, du substrat ainsi que le poids de l'eau engendré par la rétention de l'eau pluviale dans les substrats de croissance. Aussi, une inspection bisannuelle du toit vert est également conseillée afin de s'assurer qu'il n'y a pas par exemple de végétations indésirables ou trop grandes qui surplomberaient sur le toit. Il y a donc un léger coût d'entretien relié à ces toits, lequel est estimé à un peu plus d'une centaine de dollars annuellement pour une toiture privée (Sémary, 2012).

Les toits verts de gazon faisaient partie depuis longtemps, soit avant le premier millénaire (Béliveau et Trottier, 2009), du mode de fabrication des bâtiments chez les Scandinaves pour permettre une meilleure isolation thermique (Castonguay, 2013). Les économies d'énergie provenant de l'utilisation d'un toit vert sont considérables. Une étude réalisée à Montréal portant sur la performance énergétique révèle que les échanges de flux thermique à travers un toit végétalisé permettent de réduire la consommation d'énergie du bâtiment allant jusqu'à 47,2 % pour une toiture verte intensive et de 37,7 % pour une toiture verte ne nécessitant pas de système d'irrigation, c'est-à-dire un toit extensif (Jacquet, 2011). Qui plus est, le coût du cycle de vie des matériaux utilisés pour la construction d'un toit vert est inférieur ou égal à celui d'un toit traditionnel (Peck et Kuhn, s. d.). Cela est notamment dû à une augmentation de la durée de vie du toit, laquelle peut en être doublée.

Outre les avantages économiques directs liés à l'efficacité énergétique, les toits verts permettent de réduire les coûts liés au traitement des décharges pluviales. En effet, les toits verts permettent d'absorber entre 50 % et 100 % les eaux pluviales (Toits Verts, 2015). Cela constitue un excellent moyen pour réduire les surverses municipales. Qui plus est, les toits verts sont de véritables adversaires pour lutter contre les îlots de chaleur. Or, une relation étroite a été établie entre la température et le taux de mortalité ainsi que la morbidité, et cette problématique en milieu urbain est encore plus accentuée (Larrivée, Sinclair-Désgagné, Da Silva, Revéret, Desjarlais, 2015). Comme indique Larrivée et al. (2015) le manque de données ne permet pas de quantifier le surplus des coûts associés à une plus grande hospitalisation des patients. Néanmoins, il semble juste d'affirmer que les toits verts, par son rôle de régulateur thermique, peuvent permettre une diminution des coûts relatifs aux soins de santé.

En somme, malgré les coûts initiaux liés à l'installation des toits verts, ceux-ci représentent de nombreux avantages sociaux, économiques et environnementaux tant pour la collectivité que sur le plan privé.

### **3.2 Murs végétaux**

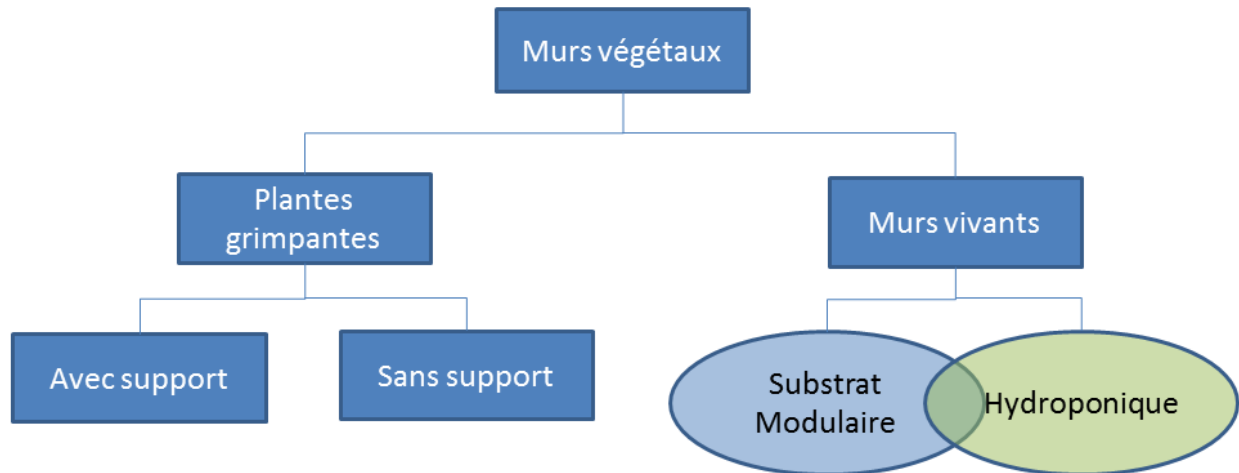
Au confluent de la nature et de l'artifice se sont érigées les villes où restent gravées l'histoire et la culture de la civilisation depuis les temps antiques jusqu'à aujourd'hui. C'est à travers le design urbain du milieu bâti que s'expriment les tentatives de l'Homme pour mieux cohabiter en harmonie avec la nature. En effet, depuis toujours les êtres humains apprécient et ressentent le besoin d'être en contact avec l'environnement (Bernier, 2011). Les murs végétaux en milieu urbain sont le reflet de la manifestation d'une interaction plus harmonieuse entre l'humain et un écosystème en perpétuel changement. Dans cette section, les murs végétaux aussi appelés façades végétales feront l'objet d'une présentation. Ensuite, l'on tentera de déterminer les conditions optimales de séquestration de carbone en milieu urbain par la végétation des

murs verticaux. Finalement, une analyse économique des murs végétaux sera également effectuée afin d'évaluer la faisabilité de l'implantation des façades végétales urbaines au Québec.

### **3.2.1 Présentation des murs végétaux**

En complémentarité avec les toitures végétales, les murs végétaux brisent l'ordre préétabli des infrastructures grises classiques en fusionnant art, architecture et végétaux au cœur des cycles naturels et de l'érection des bâtiments (Lambertini et al., 2007). L'histoire des façades végétales permet de retracer les premières formes de murs végétalisés autour du VI<sup>e</sup> siècle avant J.-C avec les Jardins de Babylone mis en place par Nabuchadnezzar II (Bernier, 2011). Puis, de nombreuses années s'écoulèrent laissant les plantes grimpantes comme étant pratiquement les seuls végétaux de revêtement des murs végétaux, réservés surtout à une classe sociale élitiste. Il a fallu attendre jusqu'en 1972 avant que la végétalisation des bâtiments ne se démocratise avec Friedensreich Hundertwasser qui publia à Vienne un livre s'intitulant « Ton droit de fenêtre — Ton devoir d'arbre », un manifeste qui apporta une nouvelle couleur à la végétalisation du bâti en y apportant un ton philosophique voulant que l'Homme ait la liberté de construire en vertical, mais que son devoir est de le faire en harmonie avec l'environnement (Bernier, 2011). L'année 1988 fut également un tournant en matière d'amélioration des technologies pour les murs végétaux. À cet égard, il faut souligner l'apport de Patrick Blanc, un Français aux cheveux verts, qui détient le premier brevet d'invention dans le domaine du mur végétal (Blanc, 1988). Malgré l'évolution des murs végétaux au fil du temps, la présence de ceux-ci en Amérique du Nord est restée tout de même très limitée notamment en raison du climat hivernal (Dunnett et al., 2008) et leurs réputations, parfois perçues à tort, d'endommager le revêtement des bâtiments ne contribue guère à encourager leur implantation (CEUM, 2013). Cependant, depuis les dernières années, les murs végétaux gagnent de plus en plus en popularité et les techniques horticoles à cet égard, se perfectionnant, permettent aujourd'hui de mieux intégrer le verdissement des murs dans un contexte nord-américain (Laberge, 2012). La diminution des coûts pour la création d'une œuvre murale végétale favorise également la végétalisation des murs dans le paysage urbain, et ce, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur du milieu bâti. Les murs végétaux se sont instaurés comme une solution pratique lorsque le besoin de verdifier se fait sentir dans un lieu où l'espace est contraignant (Bernier, 2011b).





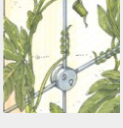

La littérature évoque deux types de murs végétaux, soit ceux qui sont recouverts de plantes grimpantes et ceux communément appelés les « murs vivants ». L'organigramme suivant présente ces types de murs de même que leurs sous-catégories.



**Figure 3.2 Types de murs végétaux et leurs sous-catégories** (inspiré de CEUM, 2013 et Bernier, 2011 b)

Le premier type de murs végétalisés consiste en l'utilisation de plantes grimpances pour recouvrir les façades verticales de végétation. Ces plantes grimpances sont plantées dans le sol près du mur et croissent en hauteur en recouvrant les murs de leurs tiges et feuillages. Dépendamment des plantes, les plus volubiles notamment nécessitent d'avoir recours à un treillis métallique pour grimper, alors que d'autres peuvent s'accrocher directement sur les parois des murs (CEUM, 2013). En fait, les plantes grimpances sont classées selon leurs modes de préhension, c'est-à-dire selon la manière dont elles s'accrochent pour grimper. Les grimpances à ventouses ainsi que les grimpances à racines-crampons n'ont nul besoin de support pour grimper en hauteur. Ces plantes peuvent aisément s'agripper aux aspérités du mur pour monter en hauteur. Les autres types de plantes grimpances nécessitent un support pour grimper. Cela est le cas pour les grimpances à tiges volubiles, à pétioles volubiles, à vrilles et à palissiers (Bernier, 2011b). La végétalisation des murs par les plantes grimpances, ne nécessitant pas de système d'irrigation, est plus facile à réaliser comparativement aux murs vivants. En fait, Anne-Marie Bernier, auteur du guide « Les plantes grimpances, une solution rafraichissante », considère l'emploi des plantes grimpances comme étant « la façon la plus simple, efficace et accessible de verdir une surface verticale » (Bernier, 2011 b). Le tableau suivant présente un résumé des différents types de plantes grimpances et leurs caractéristiques.

**Tableau 3.3 Les types de plantes grimpantes et leurs besoins en support** (adapté de : Bernier, 2011 b)

Plantes grimpantes	Requièrent un support (treillis)	Ne requièrent pas de support (treillis)
 à racines-crampons		✓
 à ventouses		✓
 à tiges volubiles	✓	
 à pétioles volubiles	✓	
 à vrilles	✓	
 à palissiers	✓	

Le deuxième type de murs végétaux est relatif à l'idée de donner « vie » aux murs en laissant croître les plantes à même le mur. Ces types de murs végétalisés sont en quelque sorte des « murs vivants » dans une optique où il est permis de considérer que la genèse de la vie, à l'image de la croissance des plantes, tire son origine des nutriments contenus dans le mur ou fixé à ce dernier. Plus complexes à mettre en œuvre, les murs vivants requièrent l'installation d'une membrane imperméable ainsi qu'un système d'irrigation. Ce dernier est un élément crucial pour garder les végétaux muraux en vie durant toute l'année (Laberge, 2012). Les murs vivants sont classés en trois catégories, soit les murs modulaires avec substrat de croissance, les murs dont les végétaux sont en mode de croissance hydroponique et finalement toutes combinaisons de ces deux premières catégories de murs (Bernier, 2011b).

La première catégorie de végétalisation des murs vivants consiste à laisser croître les plantes de manière à ce qu'elles s'enracinent dans un médium fixé au mur, un substrat léger qui fait partie intégrante du mur. Cela consiste plus concrètement à apposer plusieurs compartiments contenant le substrat de croissance au



mur. Du point de vue artistique, cela laisse la possibilité d'agencer les plantes et leurs végétations de telle manière à créer des formes d'art intéressantes. Cette forme de végétalisation des murs nécessite un système d'irrigation performant permettant d'alimenter chacun des compartiments en eau et en fertilisant. La figure 3.3 ci-dessous montre des exemples de ce type de mur végétalisé avec substrat de croissance.



**Figure 3.3 Exemples de murs végétalisés avec substrat de croissance** (tiré de Mur Mure Végétal, 2011)

La deuxième forme de murs vivants, plus sophistiquée, fait appel à la technique de l'hydroponie, où les plantes s'alimentent à partir d'un système d'irrigation d'eau goutte à goutte ou en flux. Patrick Blanc, un des chercheurs les plus connus dans le domaine des murs végétaux possède un brevet d'invention sur le « Mur Végétal ». Le Mur Végétal étant un mur végétal à croissance hydroponique; cela consiste plus précisément en un « dispositif pour la culture sans sol des plantes sur une surface verticale », tel qu'écrit dans l'enregistrement de son brevet auprès de l'Institut national de la propriété industrielle à Paris en 1988 (Blanc, 1988). Populaire en France, le mur végétal à croissance hydroponique ne requiert aucunement de substrat de croissance. En fait, le substrat conventionnel est substitué par un système d'irrigation qui nourrit les plantes en leur distribuant, à travers les capillarités des membranes géotextiles, un liquide riche en éléments nutritifs (Bernier, 2011b). Les éléments nutritifs contenus dans le liquide peuvent en outre être dosés en fonction des plantes qui y sont plantées dans le mur afin de favoriser une croissance accrue et en santé. De plus, une gamme intéressante de végétaux peut être utilisée dans l'emploi des murs à croissance végétale en mode hydroponique et certains de ces végétaux sont même adaptés aux hivers doux que connaît par exemple la France.



**Figure 3.4 Composantes d'un mur végétal hydroponique (tiré de Mur Mure Végétal, 2011)**



**Figure 3.5 Mur végétal hydroponique du Musée du Quai Branly, Paris** (tiré de : Bernier, 2011 b, p. 18)

La troisième catégorie de mur vivant combine l'utilisation de compartiments avec substrat de croissance avec un système hydroponique. Cela permet de créer un mur ayant également une grande possibilité d'héberger une grande diversité de végétaux muraux.

### **3.2.2 Les conditions favorisant la séquestration**

Le verdissement des façades verticales s'est implanté au fil du temps dans un esprit d'art, dans une optique de rendre le paysage urbain plus attrayant et de donner une ambiance plus naturelle au confinement d'une ville urbanisée. Selon Patrick Blanc, les murs végétaux s'inscrivent dans une approche scientifique et esthétique (Ligne verte, s. d.). Au-delà de l'aspect esthétique du mur végétal, sa mise en place procure également des bénéfices sur la qualité de l'air et permet une meilleure efficacité énergétique (Ligne verte, s. d.). Toutefois, la littérature se fait bien timide à l'égard de la fonction de séquestration de carbone que peut jouer le verdissement des murs. Cependant, il demeure possible de dresser un portrait des conditions favorisant la séquestration de carbone par les murs végétaux en se basant sur certaines sources

d'informations disponibles relevant notamment de la FIHOQ et de certaines expérimentations qui ont été effectuées en lien avec les murs végétaux dont il est possible d'effectuer des liens avec la séquestration de carbone.

L'organisme à but non lucratif Vivre en Ville a effectué un projet pilote dans la ville de Québec en plantant différentes espèces de plantes grimpantes, soit la vigne de vierge, l'hydrangée grimpant ainsi qu'une espèce populaire en France, la bignone commune (Bernier. 2011). Ce projet, qui s'est déroulé de 2001 à 2007 a permis de tirer quelques pistes pouvant être mises en lien avec la volonté de favoriser la séquestration de carbone. Parmi les plantes grimpantes mises à l'épreuve, la vigne de vierge s'est avérée celle qui défierait le mieux les températures froides, celle présentant aussi le taux de croissance la plus rapide ainsi que le déploiement de recouvrement de la surface du mur le plus élevé (ibid.).

La Fédération interdisciplinaire de l'horticulture ornementale du Québec (FIHOQ) expose aussi quelques lignes directrices générales en matière de séquestration de carbone. Notons que la citation suivante peut aussi être appliquée aux toits verts :

« De façon générale, le type de plantes (arbres, arbustes, conifères, plantes herbacées, etc.), la densité de plantation, l'entretien et la longévité des végétaux influencent le degré de séquestration du carbone » (FIHOQ, 2013).

Cet énoncé, bien que vague à première vue, permet tout de même d'identifier une ligne de base sur les conditions permettant de favoriser la séquestration de carbone par les végétaux. Ainsi, si les bonnes essences végétales sont choisies, la séquestration de carbone par le verdissement des murs peut donc alors y être favorisée. Dans cette optique, il importe que les plantes extérieures soient adaptées au climat de la région. Au Québec, l'éventail de plantes grimpantes disponibles est assez limité. La vigne vierge (*Parthenocissus quinquefolia* (figure 3.6) et la lierre de Boston (*Parthenocissus tricuspidata*) (figure 3.7) de la famille des ventouses ainsi que l'hydrangée grimpant (*Hydrangea anomala susp. petiolaris*) (figure 3.8) de la famille des grimpantes à racines grimpantes sont les trois plantes grimpantes qui peuvent supporter le mieux le climat québécois (Hodgson, 2008). Toutefois, il est possible de retrouver au Québec d'autres plantes grimpantes de types vivaces comme la clématite (figure X.X) ainsi que l'amphicarpe bractéolée, cette dernière étant indigène. Les figures suivantes illustrent les trois plantes grimpantes résistantes au climat du Québec ainsi que la clématite.



**Figure 3.6 Vigne de vierge** (tiré de : Laberge, 2012)



**Figure 3.7 Lierre de Boston** (tiré de : Fassaden Grün, 2016)



**Figure 3.8 Hydrangée grimpante** (tiré de : Au jardin, 2016)



**Figure 3.9 Clématite** (tiré de : Laberge, 2012)

Au Québec, pour le revêtement végétal des murs extérieurs, l'utilisation des plantes grimpantes s'avère être de mise, non seulement pour sa simplicité, mais également parce qu'il n'existe pas à ce jour de plantes à croissance hydroponique qui puissent résister au climat rigoureux du Québec (Bernier, 2011b). Les recherches de Patrick Blanc sur les murs hydroponiques ont permis de découvrir des plantes qui peuvent résister à un climat non tropical, mais sans pour autant pouvoir endurer un climat hivernal tel que connaît le Québec (Bernier, 2011b).

Vergriete et Labrecque (2007) mentionnent par ailleurs l'importance de bien choisir l'emplacement de la végétalisation du mur de façon à maximiser l'exposition des feuilles aux rayons solaires. Rappelons que la séquestration de carbone est intimement liée au phénomène de la photosynthèse, laquelle requiert l'utilisation de l'énergie solaire. Ainsi, en disposant les feuillages de manière à ce que celles-ci soient en contact avec les rayons solaires, la séquestration de carbone serait favorisée grâce à l'augmentation de l'activité photosynthétique.

D'autre part, même si la littérature est peu abondante à ce sujet, les principales conditions permettant de favoriser la séquestration de carbone par la végétalisation des murs verticaux ont pu être identifiées. Le tableau suivant présente un résumé des conditions pouvant permettre de favoriser la séquestration de carbone au Québec :

**Tableau 3.4 Conditions favorisant la séquestration de carbone par les murs végétalisés au Québec**

Facteurs influençant la séquestration de carbone	Sources
Maximiser l'exposition des feuillages aux rayons solaires	(tiré de : Vergriete et Labrecque, 2007)
Choisir des plantes adaptées au climat de la région	(adapté de : FIHOQ, 2013)
Privilégier les plantes à croissance rapide	(tiré de : Bernier, 2011 b)
Privilégier les plantes à grand déploiement de couvertures murales	(tiré de : Bernier, 2011 b)
Utiliser la technologie hydroponique que pour végétaliser les murs intérieurs	(inspiré de : Bernier, 2011b)

### 3.2.3 Faisabilité économique

C'est en Europe, notamment en France, que les murs végétaux connaissent une grande popularité. Depuis la dernière décennie, il existe de plus en plus de produits sur le marché permettant de verdir le milieu bâti. Au Québec, la situation est différente puisque les murs végétaux ne sont qu'à leurs débuts, bien que la tendance vers la végétalisation du bâti commence à être de plus en plus présente dans nos milieux. Ainsi, l'analyse économique des murs végétaux en contexte québécois demeure encore peu documentée. Néanmoins, il est possible d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de la faisabilité économique des murs végétaux au Québec en se référant notamment aux études effectuées dans un contexte européen. Le tableau ci-dessous présente les coûts relatifs à l'installation et à l'entretien des murs végétaux selon différentes technologies utilisées en Europe. Notons que les coûts d'installation ainsi que les frais d'entretien sont exprimés en dollars canadiens correspondant à une conversion de devise de l'euro en dollar canadien en 2013, soit l'année de sortie de l'étude de Perini et Rosasco (2013). En 2013, l'on pouvait échanger en moyenne 100 \$ CAN pour 73,14 € (X-Rates, 2016).

**Tableau 3.5 Coûts d'installations et d'entretiens relatifs aux différents types de murs végétaux**  
(adapté de Perini et Rosasco, 2013, p. 5)

Murs végétaux	Coûts d'installations / m <sup>2</sup> (\$ CAN, 2013)	Frais d'entretien / m <sup>2</sup> / an (\$ CAN, 2013)
Plantes grimpantes	40-60	4
Plantes grimpantes + support	50-110	4
Compartiments et support en plastiques	130-210	15
Compartiments et support en acier galvanisé	1100	12
Murs vivants (hydroponiques)	550-1650	37

Il est possible de remarquer que l'utilisation de plantes grimpantes dans la végétalisation à la verticale comporte le moins d'investissement au départ. En effet, le coût d'installation par mètre carré à couvrir revient entre 40 \$ et 60 \$ environ pour l'utilisation de plantes grimpantes seulement et le prix peut monter à 110 \$ environ si l'on envisage d'installer un support grimpant par exemple un treillis métallique. Cependant, comme il a été mentionné précédemment, peu d'espèces de plantes grimpantes sont disponibles au Québec étant donné le climat hivernal de la région limitant ainsi la biodiversité murale. Il est aussi possible de combiner des boîtes, c'est-à-dire des compartiments, avec la technologie utilisant le support grimpant pour verdir un mur. Les prix peuvent ainsi varier de quelques centaines de dollars par mètre carré à couvrir environ à plus de 1000 \$ / m<sup>2</sup> dépendamment si le matériel utilisé est du plastique ou de l'acier galvanisé respectivement. Le mur vivant est sans contredit le type de mur végétal le plus dispendieux pouvant atteindre plus de 1500 \$ / m<sup>2</sup> de végétalisation. Toutefois, ce type de mur végétal, qui rappelons-le utilise une technologie de croissance hydroponique, possède comme principal avantage de pouvoir accueillir une plus grande variété de plantes lorsque le climat hivernal est doux. Notons également pour en ce qui a trait au Mur Végétal hydroponique de Patrick Blanc, la technologie brevetée par celui-ci permet de « s'affranchir des problèmes de poids du substrat et, par conséquent, d'assurer la végétalisation des surfaces des bâtiments, quelle que soit leur hauteur » (Blanc, s. d.). Le Mur Végétal de Patrick Blanc, même s'il s'avère dispendieux, est largement répandu à travers le monde pour revêtir les murs de végétaux pour plusieurs bâtiments d'envergures. Cependant, au Canada, l'utilisation du mur hydroponique ne serait possible qu'à l'intérieur des bâtiments en raison du climat froid.

Les coûts d'entretien s'avèrent également plus dispendieux pour la technologie hydroponique par rapport à la végétalisation verticale utilisant les plantes grimpantes en raison des frais supplémentaires engendrés

par le changement des panneaux hydroponiques lorsque ceux-ci sont brisés et de l'entretien de son système d'irrigation.

Les bénéfices économiques engendrés par les murs végétaux sont nombreux. Le tableau suivant présente les différents bénéfices que les murs végétaux peuvent apporter.

**Tableau 3.6 Avantages financiers des murs végétaux** (tiré de : Perini et Rosasco, 2013), p. 115)

Murs végétaux	Économie de climatisation	Augmentation de la longévité des murs	Augmentation de la valeur de la propriété foncière
Bénéfices privés	10-20 %	15 ans	2-5 %

D'abord, les murs végétaux peuvent jouer un rôle d'isolation permettant une réduction de la consommation énergétique en climatisation de l'ordre de 10 % à 20 % dans une région climatique s'apparentant à celui de l'Italie (Perini et Rosasco, 2013). Parfois perçues à tort d'endommager les murs, certaines personnes pensent que les racines ou les tiges des plantes, en grimpant sur les parois des murs, s'infiltreront dans les fissures brisant ainsi les murs. Ceci est une fausse perception puisque les racines ou les tiges des plantes n'ont pas la capacité de transpercer les murs, ils ne peuvent s'infiltrer à travers les murs que si le mur est déjà fissuré. En réalité, la végétalisation des murs protège ceux-ci et augmente même la durée de vie des murs. En effet, la végétalisation des murs offre une protection supplémentaire des murs contre les pluies acides, les rayons ultra-violet (UV) ainsi qu'à d'autres formes de pollution. Cela permet un ralentissement de la dégradation des murs et permet, par conséquent, d'augmenter la longévité du revêtement des murs de 15 ans (Perini et Rosasco, 2013). En outre, Perini et Rosasco (2013) estiment que les murs végétaux augmentent la valeur de la propriété foncière de 2 % à 5 % dépendamment de la localisation de la propriété dans une ville.

Qui plus est, les murs végétaux peuvent fournir des bienfaits sociaux en matière de séquestration de carbone et d'absorption de polluants atmosphériques. De plus, les murs végétaux peuvent jouer un rôle dans la régulation thermique des îlots de chaleur urbain et embellir le paysage urbain (Perini et Rosasco, 2013). Cependant, la valeur économique de ces bénéfices ne peut être quantifiée que partiellement et s'avère marginale puisque le bénéfice économique réel des murs végétaux ne peut se faire ressentir que s'il y en a un grand nombre sur une grande échelle (Perini et Rosasco, 2013). Il n'est donc pas possible pour le moment, dû à l'absence de données, d'évaluer de façon complète l'apport économique sociétal que procure un mur végétal individuellement (Perini et Rosasco, 2013). Il est cependant permis de présumer de manière qualitative que les murs végétaux apportent des bénéfices sociétaux considérables en matière



d'amélioration de la qualité de vie des citoyens en milieu urbain parce que le verdissement vertical apporte une connexion avec la nature, là où l'espace horizontal occupé par l'être humain est restreint.

Finalement, selon une analyse coûts-bénéfices de Perini et Rosasco (2013), l'utilisation des plantes grimpantes s'avère être l'option la plus économiquement durable, alors que les murs hydroponiques ne représentent pas une solution économiquement durable puisque les coûts élevés d'installation et d'entretien empêchent l'atteinte d'un point qui permet le retour sur investissement. Les bénéfices engendrés par l'utilisation des plantes grimpantes dans la végétalisation des murs permettent un retour sur l'investissement sur une période de vingt ans environ. Mais, il faut dire que les bénéfices ayant fait l'objet des calculs coûts-bénéfices sont conservateurs en raison du fait que seulement les bénéfices concernant l'augmentation de la valeur de la propriété marchande ainsi que les économies reliées à une meilleure efficacité énergétique ont été principalement pris en compte dans l'analyse coûts-bénéfices de Perini et Rosasco.

### **3.3 Les arbres en milieu urbain**

Orné d'une feuille d'érable, le drapeau du Canada témoigne de l'attachement qu'ont les Canadiens à l'égard de la nature au Canada. Ce pays, possédant plus de 400 millions d'hectares de forêts, détient dix pour cent des forêts mondiales (Rosen, 2015). Aujourd'hui, les forêts urbaines sont de plus en plus tenues en compte par les municipalités en regard à la protection et à la mise en valeur des écosystèmes urbains. Les arbres urbains procurent également d'incalculables bienfaits pour les humains tant au niveau social, environnemental qu'économique. Dans cette section, les forêts urbaines et les parcs urbains feront l'objet d'une présentation regroupée sous la thématique des arbres urbains. Aussi, cette section tentera d'élucider les facteurs permettant de favoriser la séquestration de carbone par les arbres urbains. Finalement, une analyse économique des arbres urbains sera également effectuée afin d'évaluer la faisabilité de l'implantation de forêts urbaines ainsi que d'arbres urbains au Québec.

#### **3.3.1 Présentation des arbres urbains**

Depuis l'époque de la colonisation au XVII<sup>e</sup> siècle, les parcs urbains se sont insérés dans le paysage québécois et l'aménagement des parcs témoigne d'une longue évolution de la culture et de l'histoire du Québec (Fernet et Williams, 1983). L'isolement du milieu urbain face à la nature a suscité un intérêt pour la création de nouveaux espaces laissant la possibilité aux gens d'aller se récréer pour pouvoir se reposer de la vie urbaine. Les parcs urbains profitèrent également du souffle engendré par le mouvement « *City Beautiful* », une philosophie présente vers la fin des années 1800 et le début des années 1900 voulant

améliorer l'esthétisme du milieu urbain en encourageant notamment les travaux d'embellissement des parcs. En outre, soulignons que le parc du Mont-Royal à Montréal créé en 1874 par l'architecte paysagiste Frederick Law Olmsted avec la permission de la Commission canadienne du tourisme, fut un événement précurseur de l'apparition de nombreux parcs urbains durant les années 1880 à 1914 (Baeyer, 2015). Le parc urbain national de la Rouge est le premier parc urbain national du Canada et celui-ci bénéficie d'une protection inégalée dans le monde. En 2015, la *Loi sur le parc urbain national de la Rouge* lui confère une protection sans précédent à l'échelle mondiale allant jusqu'à imposer au gouvernement du Canada « l'obligation de protéger les écosystèmes naturels et les paysages culturels de la Rouge, de maintenir la faune indigène et d'assurer la santé de ces écosystèmes » (Parcs Canada, 2016). Le parc urbain national de la Rouge est situé en Ontario. Cette province voisine du Québec a commencé tôt à considérer l'aménagement des arbres dans son paysage. En effet, vers la fin du XXe siècle, l'Ontario — leader canadien en matière de forêt urbaine — a commencé à planter de l'orme d'Amérique ainsi que des érables pour façonner les rues urbaines. Au Québec, le secteur de la foresterie urbaine a fait son entrée à l'Université Laval dans une optique de recherche pour lutter contre le ravage causé par la maladie hollandaise de l'orme (Rosen, 2015), laquelle a atteint le Québec durant les années 60 et 70 (Arbres Canada, 2009). L'orme d'Amérique qui décorait jadis le paysage urbain par sa belle forme de vase a été remplacé principalement par le frêne à la suite des infections causées par la maladie hollandaise de l'orme. La figure suivante montre le frêne noir ainsi que l'orme d'Amérique respectivement de gauche à droite.



**Figure 3.10 Le frêne noir et l'orme d'Amérique** (tiré de : Arboquebecium, 2016)

Malheureusement, la prolifération de l'agrile du frêne, un insecte coléoptère détecté pour la première fois en 2002 en Ontario, s'est révélée encore plus destructeur pour les arbres que la maladie hollandaise de l'orme (Rosen, 2015) même. Actuellement, le Québec est fortement confronté à l'intrusion de ce coléoptère dans la foresterie urbaine, lequel menace d'éradiquer les frênes urbains québécois. La gestion de cette problématique durant les 30 prochaines années pourrait coûter deux milliards de dollars aux municipalités canadiennes (Ressources naturelles Canada [RNC], 2016). L'auteur de l'essai a d'ailleurs assisté au premier Sommet sur les infrastructures naturelles du Grand Montréal qui s'est tenu à l'Université du Québec à Montréal (UQAM) en juin 2016 sous la thématique : « S'investir pour renforcer la résilience de nos villes face aux changements climatiques » (David Suzuki, 2016). À cette occasion, plusieurs panélistes ont sans cesse souligné l'importance de planter une grande diversité d'arbres, d'arbustes et de végétaux dans le but de renforcer la résilience face aux changements climatiques. La règle du « 10 %-20 %-30 % » de Frank S. Santamour Jr — reconnue par l'*International Society of Arboriculture* (ISA) — suggère que « la distribution de la forêt urbaine ne devrait pas excéder proportionnellement 10 % d'une seule espèce, 20 % d'un même genre, ou 30 % d'une même famille », et ce, afin de favoriser une diversité urbaine résiliente (Légaré et Tremblay, 2014). Force est de constater que les leçons apprises par les problématiques liées à l'orme d'Amérique et au frêne, que « l'arbre de rue parfait » n'existe pas. En effet, les leçons que l'on peut tirer des erreurs qui ont été effectuées en matière de foresterie urbaine suggèrent d'accroître la diversité d'espèces d'arbres plantés afin de renforcer la résilience de ceux-ci face notamment aux infections biologiques, comme c'est le cas actuellement avec l'agrile du frêne, mais aussi face aux changements climatiques.



**Figure 3.11 L'agrile du frêne** (tiré de : RNC, 2016)

Au Québec, il existe 77 espèces d'arbres dont 49 sont indigènes et 28 ont été introduites (Arboquebecium, 2016). Ces arbres sont divisés en deux groupes, soit les *angiospermes* (feuillus) et les *gymnospermes* (conifères). Ceux-ci jouent un rôle de purification de l'air particulièrement utile en milieu urbain, car ils absorbent plusieurs polluants atmosphériques qui y sont émis, tels que le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et l'ozone. Qui plus est, les arbres absorbent des métaux lourds tels le cadmium, le chrome, le nickel ainsi que le plomb. La végétalisation des rives des cours d'eau par les arbres est également précieuse puisque ceux-ci agissent comme des filtres de rétention en regard à l'azote dans le sol. Cela permet de

réduire l'eutrophisation et de limiter la contamination des eaux (Vergriete et Labrecque, 2007). Qui plus est, il est aussi reconnu que la foresterie urbaine constitue, à l'instar des toits verts, un excellent moyen pour lutter contre les îlots de chaleur. Outre l'ombrage que procurent les arbres, ceux-ci refroidissent l'air ambiant grâce à l'évapotranspiration. En effet, un arbre peut absorber jusqu'à 450 litres d'eau et le dissiper sous forme d'évapotranspiration. L'effet d'évapotranspiration de l'arbre dissipe entre 70 % et 80 % de l'énergie issue de l'irradiation solaire (Coordination Eau-île-de-France, 2016). Cependant, il importe que l'arbre dispose d'une quantité suffisante d'eau afin de pouvoir faire profiter à la population de sa capacité de climatiseur naturel.

### **3.3.2 Les conditions favorisant la séquestration**

Parmi les techniques de verdissement urbain, les arbres urbains possèdent la plus grande capacité de séquestration de carbone dans le milieu urbain. Une étude effectuée dans la ville de Leicester estime à 97 % la part de la séquestration de carbone en milieu urbain par les arbres urbains (Zoé, Edmondson, Heinemeyer, Leake et Gaston, 2011). Toutefois, les arbres urbains peuvent subir des pressions externes tels que la pollution atmosphérique, l'achalandage urbain et le contact avec les sels de voiries. Ces pressions externes peuvent nuire à la santé des arbres et, par conséquent, réduire la quantité de carbone séquestrée au cours de la vie des arbres.

La faible résilience écologique d'un arbre peut réduire de façon considérable la séquestration de carbone par celui-ci s'il subit une attaque d'un organisme comme c'est le cas actuellement pour le frêne. L'abattage prématuré de l'arbre infecté empêche celui-ci de continuer à remplir sa fonction de séquestration de carbone. Dans le cas de l'orme d'Amérique et du frêne, l'Homme, en plantant le même type d'arbre sur des rangées et des rangées de rues, a favorisé un milieu où peuvent se développer certains organismes mieux adaptés que d'autres pour y vivre. Cela peut créer un déséquilibre écologique pouvant se traduire par une pathologie affectant les arbres. Par exemple, un « arbre de rue » est plus vulnérable face aux pressions externes qui peuvent s'exercer sur lui.

Ainsi, afin de favoriser la séquestration de carbone par les arbres urbains, il est donc primordial de s'assurer de planter diverses essences d'arbres le long d'une rue dans cette optique de résilience. Cela permet d'assurer une longévité globale accrue des arbres et par conséquent cela laissera le temps aux arbres d'absorber une plus grande quantité de carbone. De plus, il est également suggéré de reproduire un miniécosystème à l'égard des arbres de rues en plantant par exemple d'autres types de végétation comme des arbustes, des plantes, etc. au pourtour de l'arbre afin que celui ne soit pas encloué seul. Une augmentation supplémentaire de séquestration de carbone par ces végétaux s'ajoute donc au bilan de la

séquestration de carbone en milieu urbain. En outre, l'effet de cette plantation supplémentaire de végétaux autour de l'arbre permettra à celui-ci d'être mieux entouré de végétaux. Ce concept est particulièrement intéressant à l'égard de la résilience. En effet, les interactions qui interviennent entre l'arbre et ses voisins végétaux permettent de mettre en place de façon naturelle, une symbiose d'entraide entre les différents végétaux, de même qu'entre les différents organismes qui peuvent venir se joindre dans le miniécosystème. Certes, une certaine compétitivité peut venir s'installer dans le miniécosystème de « l'arbre de rue », mais celle-ci est nécessaire puisqu'elle contribue en fin de compte à une meilleure résilience de l'écosystème urbain. Un organisme peut rechercher par exemple certains types de végétation et interagir avec d'autres organismes, insectes ainsi qu'avec la végétation qui y est présente. Cela aura pour effet de tendre vers un équilibre écosystémique — pierre angulaire de la résilience.

Dans le même ordre d'idées concernant les écosystèmes, la plantation des arbres et des végétaux peut être effectuée en concordance avec le principe de la restauration et de la préservation des écosystèmes relatifs aux corridors verts aussi appelés les corridors biologiques. Ces corridors sont vitaux, car ils assurent des fonctions migratoires tout en fournissant un habitat pour les espèces. La fragmentation des écosystèmes naturels en milieu urbain dû à la construction des infrastructures grises et de la conversion des terres agricoles peuvent fragiliser la faune et de la flore du milieu, ce qui peut induire l'extinction de certaines espèces.

La prise en compte des corridors verts dans la gestion territoriale devient de plus en plus importante considérant que l'être humain est à l'origine du début de la sixième extinction massive des espèces (Kolbert, 2015). L'extinction des espèces, découlant notamment du réchauffement planétaire, se fait à un rythme sans précédent, et ce, depuis le début de l'humanité (Gonzalez, Ronce, Ferriere et Hochberg, M. E., 2013). À ce rythme, d'ici cent ans, le quart des mammifères, le huitième des oiseaux et le tiers des amphibiens disparaîtront de la planète (Nature-Action, 2016). Les corridors verts figurent parmi les solutions ayant le potentiel d'inverser la tendance de cette problématique en regard à l'extinction des espèces (Gonzalez et al., 2013). Il va sans dire que l'instauration des corridors verts dans la planification de la trame urbaine constitue un vecteur permettant d'augmenter le nombre d'arbres plantés et, par le fait même, favoriser une augmentation du niveau de séquestration de carbone. Les travaux de recherche de Gonzalez suggèrent de végétaliser les trames urbaines de manière stratégique, de façon à recréer les corridors verts. Cela permet d'augmenter les chances de survies des espèces fauniques et floristiques dans un contexte de bouleversements climatiques et de l'accentuation de l'urbanisation. Ainsi, les notions inhérentes aux corridors verts, comme la restauration des lieux de passages et d'habitat pour la

biodiversité par la plantation d'arbres et d'arbustes, constituent des éléments favorisant la séquestration de carbone par le verdissement urbain.

D'autres parts, le choix des espèces d'arbres à privilégier pour la plantation est important si l'on veut que ceux-ci puissent capter le maximum de CO<sub>2</sub> possible. Bien qu'il n'y ait pas d'arbre urbain parfait pour des raisons de résilience mentionnées précédemment, certaines grandes lignes ressortent quant aux choix des arbres à privilégier au Québec. Dans une perspective idéale, il faudrait choisir un arbre adapté au climat ayant une croissance rapide et qui est résistant en milieu urbain. Celui-ci devra également avoir le potentiel de devenir grand pour pouvoir emmagasiner plus de carbone au cours de sa vie. Qui plus est, l'arbre doit pouvoir tolérer le climat froid du Québec. Souvent, un arbre indigène — arbre originaire de la région de par sa propre colonisation et sans aide humaine (Arboquebecium, 2016) — possède la plupart du temps une bonne résistance à ce climat. Cependant, certaines espèces exotiques ou horticoles peuvent aussi très bien s'adapter au climat rigoureux du Québec (Légaré et Tremblay, 2014). Ensuite, une vitesse de croissance rapide de l'arbre permet de capturer plus rapidement le carbone de l'atmosphère et en quantité plus grande si celui-ci parvient à atteindre sa pleine dimension mature. En fait, plus un arbre est grand, plus il renferme de carbone, car la quantité cumulée de carbone contenue dans l'arbre est proportionnelle au poids de celui-ci. Parmi les arbres recommandés en milieu urbain ayant une vitesse de croissance rapide et adaptés aux zones de rusticité canadienne, Légaré et Tremblay (2014) répertorient ceux-ci :

- l'érable argenté
- l'érable freemanii
- l'aulne glutineux
- le peuplier à feuille deltoïde
- le peuplier à feuille deltoïde « Siouxlant »
- le saule pleureur doré
- le saule noir
- l'orme « Accolade »
- l'orme « Resista »
- l'orme « Triumph »
- l'orme « Frontier »
- le mélèze du Japon
- l'épinette de Norvège

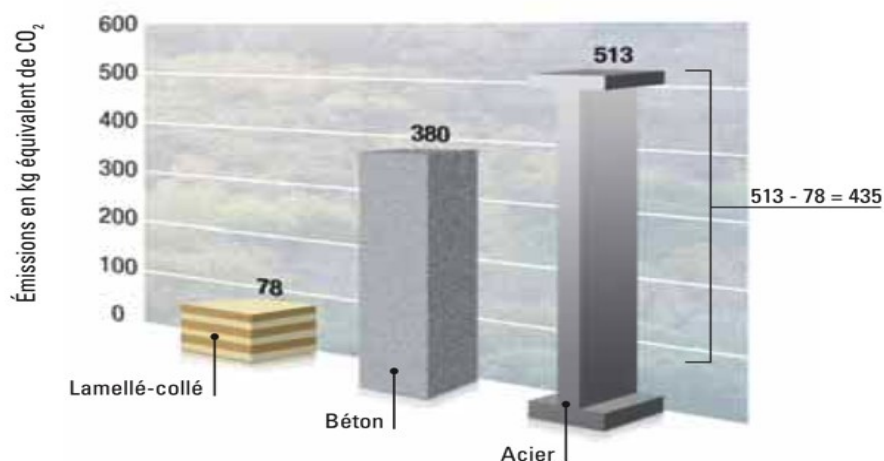
- le pin blanc
- le pin sylvestre

Il est également à noter que l'emplacement de la plantation des arbres doit également tenir compte de certaines caractéristiques particulières du milieu urbain comme les fils hautes tensions ainsi que les réglementations municipales, lesquels peuvent notamment restreindre l'emplacement de la plantation de certains arbres à grand déploiement (Hydro-Québec, 2011). Un arbre urbain subit plusieurs stress relatifs au milieu dans lequel il vit. Parmi ces stress, Légaré et Tremblay (2014) recensent notamment ceux-ci : les polluants retrouvés dans l'air, l'exposition de l'arbre aux embruns salins, l'accumulation de sels (NaCl) dans le sol ainsi que la compaction du sol. Comme le veut l'expression populaire en arboriculture, il importe de planter le « bon arbre au bon endroit ». D'ailleurs, l'étude de Zoé et al. (2011) portant sur la quantification de la séquestration de carbone à l'échelle de la ville de Leicester en Angleterre démontre l'importance de protéger et de planter les bonnes essences d'arbres et de les planter au bon endroit afin de favoriser une croissance maximale de l'arbre et donc à augmenter leurs efficacités de séquestration de carbone. Quatre localisations de plantations d'arbres en milieu urbain sont envisageables, soit les parterres, les parcs, les boisés ainsi que les rues (Légaré et Tremblay, 2014). Le choix du site de la plantation est important, car certains arbres requièrent par exemple davantage de lumière que d'autres, alors que d'autres requièrent davantage d'humidité ou d'eau pour croître de façon optimale.

De toute évidence, en plantant les arbres judicieusement, c'est-à-dire en tenant compte des facteurs présentés ci-haut eu égard aux différentes espèces d'arbres, l'espérance de vie des arbres urbains de même que leurs croissances sont optimisées. L'entretien nécessaire à la conservation de ces arbres est également minimisé si les mesures ont été prises afin de laisser place à la nature d'effectuer son travail d'équilibre écosystémique dans une optique visant à favoriser la biodiversité urbaine. Cependant, un minimum d'entretien est nécessaire afin d'assurer un taux de survie élevé des arbres plantés. D'ailleurs, « l'entretien demeure un facteur clé de la réussite d'un programme de plantation » (Ville de Montréal, 2012). Cela est d'autant plus important pour les arbres nouvellement plantés si l'on veut que ceux-ci restent en bonne santé et fournissent des fonctions écosystémiques comme la séquestration du dioxyde de carbone. En effet, durant la première saison ou de la première année, il est recommandé d'arroser fréquemment l'arbre nouvellement planté et de le recouvrir d'un paillis afin de favoriser une croissance accrue de celui-ci (Gallant A., 2000).

Finalement, afin d'assurer le maximum de séquestration de carbone par le travail de la photosynthèse des arbres, il importe de conserver la masse carbone, même à la fin de vie de l'arbre. L'utilisation du bois dans

la construction de matériaux permet de contribuer grandement à la lutte contre les changements climatiques (Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois [CECOBOIS], 2014). En effet, lorsque le bois est utilisé dans la construction d'un meuble, d'un mur, d'une poutre ou d'un bâtiment, le carbone reste piégé à l'intérieur du bois sur une plus longue période de temps. Cette utilisation de bois permet d'empêcher au bois de relâcher son carbone dans l'atmosphère par décomposition à la fin de vie de l'arbre. Les analyses de cycle de vie démontrent qu'un bâtiment construit en bois possède une empreinte écologique nettement moindre comparativement à l'utilisation du béton, de l'acier ou d'autres matériaux. À titre d'exemple, la figure ci-dessous, basée sur une analyse de cycle de vie, utilisant le logiciel *ATHENA* (CECOBOIS, 2014) montre une différence remarquable des émissions équivalentes de CO<sub>2</sub> d'une poutre en bois versus une poutre en béton et en acier servant à supporter la même charge (ibid.). Les émissions de CO<sub>2</sub> du béton et de l'acier sont plus élevées en raison notamment des procédés énergivores pour la fabrication et l'extraction de ces matériaux.



**Figure 3.12 Potentiel de réchauffement climatique d'une poutre de 7,3 m supportant une charge de 14,4 kN/m (tiré de CECOBOIS, 2014, p. 4)**

Il est à noter que l'analyse de cycle de vie prend en compte les étapes depuis l'extraction de la matière première, soit en l'occurrence le bois, le béton ainsi que l'acier jusqu'à son élimination en passant par les processus liés à la fabrication et à son utilisation (CECOBOIS, 2014). L'analyse de cycle de vie exclut donc l'apport de la séquestration de carbone par l'arbre durant sa croissance. Les forêts urbaines jouent donc un double rôle dans la lutte contre le changement climatique : d'une part, l'utilisation du bois dans la construction permet de stocker 0,9 tonne de CO<sub>2</sub> par mètre cube de bois utilisé (Cecobois, 2014). D'autre



part, la substitution des matériaux de construction énergivores par le bois — une matière renouvelable — permet d'éviter l'émission de 0,74 tonne de CO<sub>2</sub> par mètre cube de bois (Comité professionnel de développement des industries françaises de l'ameublement et du bois [CODIFAB], 2012) ou jusqu'à 1,1 tonne de CO<sub>2</sub> par mètre cube de bois (CECOBOIS, 2014). Bref, si l'on effectue les calculs selon ces informations, la contribution d'un arbre-face à la lutte contre les changements climatiques est de 1,64 tonne à deux tonnes de CO<sub>2</sub> par mètre cube de bois utilisé, mais ce, seulement si la foresterie est gérée de façon durable, c'est-à-dire de manière à « maintenir la forêt dans une phase de croissance, dans laquelle l'accroissement biologique est plus important que la décomposition biologique » (CODIFAB, 2012) ou de manière plus simple; de façon à ce que la forêt garde son statut de « puits de carbone ». Une forêt rejette également du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, mais si elle en absorbe plus qu'elle n'en émet, alors elle agit comme puits de carbone. Afin d'assurer une saine gestion durable des forêts, il ne faut pas que les récoltes forestières dépassent le volume de bois que l'on peut prélever à perpétuité dans une forêt sans réduire la capacité de production de celle-ci (Bureau du forestier en chef, 2016). Cela signifie que la capacité de séquestration de carbone d'une forêt ou de la forêt urbaine doit être conservée ou améliorée au fil du temps, et ce, en dépit d'une récolte forestière possible afin de favoriser une contribution accrue des arbres urbains face au réchauffement climatique en milieu urbain.

### **3.3.3 Faisabilité économique**

De leurs racines à leur cime, il n'est plus à démontrer que les arbres procurent de multiples avantages environnementaux et sociaux. Toutefois, les bénéfices économiques des arbres urbains sont parfois moins bien compris et c'est ce dont cette partie du travail tentera d'éclaircir brièvement.

Selon la littérature, il a été possible de constater que les bénéfices économiques reliés aux arbres urbains valent autant pour la collectivité à l'échelle municipale que pour le particulier. Les études économiques des bienfaits de la forêt urbaine tendent à considérer cinq facteurs permettant à un arbre en milieu urbain d'être considéré comme une infrastructure naturelle comportant des fonctions sociétales et environnementales présentant une valeur économique chiffrable en valeur monétaire. Les facteurs sur lesquels portent les analyses économiques associées aux arbres urbains concernent les économies d'énergie, la séquestration de carbone, l'amélioration de la qualité de l'air, les économies engendrées par la rétention des eaux par les racines des arbres ainsi que de l'augmentation de la valeur foncière des propriétés.

Les économies d'énergie en lien avec les arbres découlent du fait que les arbres jouent un rôle de régulateur thermique particulièrement efficace contre l'augmentation de la température créé par le

phénomène des îlots de chaleur prononcés en milieu urbain (Michaud, 2013). Cela permet également de réduire les coûts liés aux systèmes de la santé (Légaré et Tremblay, 2014). Un montant est aussi attribué au rôle que jouent les forêts urbaines dans la séquestration de carbone ainsi que dans la purification de l'air, car le captage des polluants atmosphériques améliore la qualité de l'air (Michaud, 2013). Aussi, le rôle que jouent les arbres urbains dans la rétention des eaux de pluie influe également sur la valeur de l'estimation des bénéfices économiques de l'arbre urbain, car cela permet de réduire les coûts de traitement des eaux usées à l'usine de filtration par la municipalité. Cela permet également de mieux gérer la problématique des surverses municipales (Vergriete et Labrecque, 2007). Enfin, aux yeux des citoyens, l'esthétisme du paysage urbain qu'améliorent les arbres dans ce milieu possède une valeur économique importante, qui se traduit par une augmentation de la valeur foncière des propriétés. En effet, la valeur marchande des propriétés situées dans des quartiers ayant un couvert arboricole considérable peut être augmentée d'environ 15 % (Légaré et Tremblay, 2014) ou jusqu'à 18 % (Vergriete et Labrecque, 2007). La littérature ne spécifie toutefois pas à partir de quels pourcentages de couvert arboré la valeur foncière des propriétés prend de la valeur.

Le tableau suivant, tiré de deux études, présente une estimation extrapolée de la valeur des bénéfices annuels que l'on peut attribuer aux arbres urbains en contexte québécois en fonction de ces cinq facteurs. Selon Vergriete et Labrecque (2007), il est permis de se référer à une étude californienne pour estimer les valeurs des bénéfices socio-environnementaux dans un contexte situé sur le territoire du Québec. Les bénéfices de l'arbre sont exprimés en dollars canadiens tant pour l'étude de Michaud (2013) que pour l'étude de Vergriete et Labrecque (2007).

**Tableau 3.7 Estimation extrapolée des bénéfices socio-environnementaux d'un arbre urbain québécois** (compilation d'après : Michaud, 2013, p. 57 et Vergriete et Labrecque, 2007, p. 20)

Type de bénéfices / arbre / an	Californie (\$ CAN)	Arrondissement Rosemont/La Petite Patrie (Montréal) (\$ CAN)	Moyenne (\$ CAN)
Économie d'énergie	14,1	0,3	7,2
Séquestration de CO <sub>2</sub>	5,8	0,3	3,0
Qualité de l'air	17,2	5,9	11,5
Rétention des eaux	4,9	2,0	3,4
Valeur foncière (esthétique)	36,7	116,1	76,4
<b>Total</b>	<b>78,6</b>	<b>124,5</b>	<b>101,6</b>

Il est possible de constater que les données de ce tableau diffèrent considérablement d'une étude à une autre, et ce, surtout à l'égard des économies d'énergie et de la séquestration de carbone. Ces variations s'expliquent par le fait que les études ont été effectuées dans des milieux différents et que les méthodes de calculs peuvent considérer des variables différentes. De plus, dans les deux cas, il importe de mentionner que les données et les valeurs qui sont attribuées aux valeurs économiques des arbres consistent toujours à des estimations, lesquelles peuvent contenir une certaine marge d'erreur. Néanmoins, il est possible de tirer des tendances et d'estimer la valeur des arbres en contexte québécois. (Vergriete et Labrecque, 2007). En outre, comme deuxième remarque, il semble étonnant que la valeur économique résultant du travail de séquestration de CO<sub>2</sub> par les arbres soit si peu valorisée dans ces études. Cela peut s'expliquer par le fait que les externalités, soit les coûts attribuables à la société due à la pollution engendrée par les émissions de CO<sub>2</sub> sont largement sous-estimés en Amérique du Nord (Synnet, 2009). Ainsi, alors que le prix du carbone au Québec actuel sur le marché se tient à environ 15-20 \$ / tonne, les Suédois ont une taxe de l'ordre d'une dizaine de fois plus élevées — s'élevant à 150 \$ / tonne — permettant vraisemblablement de mieux « internaliser les externalités » liées aux émissions carboniques dans l'atmosphère puisque l'on constate que la tarification carbone suédoise a contribué à réduire les externalités environnementales (OCDE, 2015). La Suède se classe par ailleurs « parmi les premiers pays membres de l'OCDE en matière d'écoinnovation » (OCDE, 2015). Au regard de cette performance environnementale, il faut noter que depuis l'instauration de la taxe carbone en Suède en 1991, la croissance économique du pays a augmenté de 100 % (David Suzuki Foundation, 2014). Il est également à noter que la valeur de la séquestration de carbone est appelée à être multipliée par 50 d'ici 2050 au Québec (Michaud, 2011). Ainsi, selon le tableau

ci-dessus à valeurs conservatrices, il est permis d'estimer que les bénéfices économiques annuels d'un arbre pour la communauté s'avèrent être d'au moins 100 \$/arbre en moyenne selon le tableau 3.7.

Qui plus est, les bénéfices économiques pour le particulier possédant des arbres à proximité de chez lui sont également très intéressants. En effet, les arbres urbains, s'ils sont bien placés, parviennent à entraîner des économies d'énergies considérables attribuables à la réduction des besoins en climatisation et en chauffage. Un arbre mature, par la combinaison de son ombrage, des rayons solaires qu'il réfléchit et grâce à sa capacité de convertir l'énergie issue de l'irradiation solaire sous forme d'évapotranspiration, effectue un travail remarquable de refroidissement (Coordination Eau-île-de-France, 2016). Dans cette optique, un arbre mature moyen équivaut à cinq climatiseurs fonctionnant 20 heures par jour (Vergriete et Labrecque, 2007). De plus, selon la Société canadienne d'hypothèques et de logements (SCHL) les arbres permettent de réduire de 15 % les frais de climatisation d'un immeuble et de 50 % les frais de chauffage (Légaré et Tremblay, 2014). Mieux encore, les travaux de McPherson (1994) rapportent que le simple fait de bien localiser trois arbres autour d'une maison permet d'économiser plus de la moitié de la consommation d'énergie en terme de climatisation (Vergriete et Labrecque, 2007). En lien avec la localisation des arbres, le CEUM (2013) suggère de planter de gros arbres feuillus près des faces est, sud-est, sud-ouest ainsi qu'à l'ouest des bâtiments pour augmenter l'efficacité énergétique réalisée par les arbres. Une augmentation de l'efficacité énergétique est intéressante du point de vue des économies financières substantielles potentielles. Cette augmentation de l'efficacité énergétique en lien avec la localisation judicieuse des arbres s'explique par le fait que l'ombrage causé par le feuillage des végétaux est un moyen efficace permettant de bloquer le rayonnement solaire direct qui s'abat sur les bâtiments, surtout en période de canicule (CEUM, 2013).

#### **4. LES POLITIQUES, MESURES OU INCITATIFS EN MATIÈRE DE VERDISSEMENT URBAIN DANS LE MONDE**

Ce présent chapitre offre un aperçu sommaire des principales politiques ou mesures incitatives qui sont mises en application dans quelques villes inspirantes dans le monde dont le Québec pourrait tirer profit en matière de verdissement urbain comme moyen permettant d'augmenter le potentiel de séquestration de carbone en milieu urbain. Les principaux outils à la disposition des municipalités pour atteindre cet objectif peuvent se résumer en trois catégories, soit les incitatifs financiers, l'application de règlements ou de normes ainsi que la sensibilisation. Ces mesures parfois incitatives, parfois obligatoires seront détaillées pour les différents pays et villes qui les appliquent. Dans un premier temps, l'on s'attardera à ce qu'il en est concernant les toits verts en passant par l'Allemagne et Toronto. Ensuite, l'on s'intéressera à la ville de Paris concernant le mouvement citoyen et politique relativement à la réalisation de divers projets de murs végétaux. Finalement, un regard sera porté sur les programmes favorisant une augmentation du couvert arboricole de la ville d'Atlanta.

##### **4.1 L'Allemagne, le pays des toits verts**

Pionnier dans le domaine de la végétalisation des toits, l'Allemagne est sans contredit le « pays des toits verts » avec 14 % de ses toits végétalisés et ses 86 millions de mètres carrés de toits verts (Rømø, 2012), soit le pourcentage de toits verts le plus élevé au monde dans un pays. Ainsi, il est opportun de s'intéresser aux politiques et mesures qui ont été mises en place au sein de ce pays afin de comprendre les éléments clés permettant d'atteindre ce haut niveau de végétalisation de toits.

En 1975, le *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL)*, c'est-à-dire *The Research Society for Landscape Development and Construction*, une organisation à but non lucratif, a joué un rôle clé dans le développement du mouvement favorisant l'implantation des toitures vertes en Allemagne. Le *FLL* a contribué à cet essor notamment par l'élaboration de guides techniques sur les toits verts de même que par des recherches sur les plantes pouvant croître sur un toit vert. Le *FLL* a également établi les standards de qualité en matière de construction et d'entretien des toits verts à travers le pays (Lawlor, Currie, Doshi et Wieditz, 2006).

Les années 70 en Allemagne furent également marquées par une conscientisation citoyennes à l'égard des problématiques écologiques en milieu urbain à tel point que cela a donné naissance à un parti politique influent nommé « The Greens » en 1980. C'est ainsi que sous l'influence de ce parti notamment, des programmes de subventions ont vu le jour allant jusqu'à compenser 50 % et plus des coûts relatifs à l'implantation de toits verts (Lawlor et al., 2006). De plus, les Allemands ont amendé le *Baugesetzbuch*,

soit le Code fédéral du Bâtiment ainsi que le *Bundesnaturschutzgesetz*, soit la Loi fédérale de la protection de la nature afin d'y inclure des « mesures de remplacements et de compensations écologiques » (Lawlor et al., 2006). Ainsi, selon ces mesures légales, les impacts sur l'environnement doivent être dans un premier temps évités, puis minimisés et, ce n'est qu'en dernier recours seulement que l'on fait appel à des mesures de mitigations écologiques afin d'atténuer les impacts environnementaux. Cela a eu pour effet d'encourager particulièrement une des facettes du verdissement urbain : les toits verts.

C'est de cette façon que les toits verts, par leur potentiel de rétablissement des espaces verts notamment, se sont avérés comme étant une solution de mitigation concernant la perte de végétaux liée à la construction prise par les promoteurs immobiliers. En outre, à partir des années 80, plusieurs municipalités allemandes ont commencé à facturer des coûts relatifs à la gestion des eaux pluviales, soit l'imposition d'une taxe allant jusqu'à trois dollars par mètre carré pour toute surface imperméable attribuable aux propriétés privées. À cet égard, mentionnons que les toits traditionnels constituent une surface imperméable, alors que les toits verts, par leur capacité d'absorber une partie des décharges pluviales, peuvent représenter une surface perméable. Qui plus est, une compensation financière entre 30 à 50 % des coûts relatifs à l'installation des toits verts était également octroyée en parallèle par les municipalités aux propriétaires privées (Lawlor et al., 2006). Ainsi, il est possible de constater que plusieurs facteurs ont contribué à l'essor des toits verts en Allemagne en commençant par la recherche sur les toits verts, la sensibilisation citoyenne, jusqu'aux incitatifs financiers en combinaison avec l'application de mesures réglementaires ainsi que de l'application de tarifs sur les surfaces imperméables notamment.

#### **4.2 Toronto, un essor en toits verts**

Deuxième au classement de la végétalisation des toits en Amérique du Nord à partir de 2014, la ville de Toronto possède la plus grande superficie de toits verts au Canada (*Green Roofs*, 2015). La ville de Toronto a connu un essor particulier en termes de superficie de toits verts installés durant les années 2013 et 2014. Les deux figures suivantes montrent cette évolution.

Top 10 North American Metro Regions in Square Feet of Green Roofs Installed in 2013

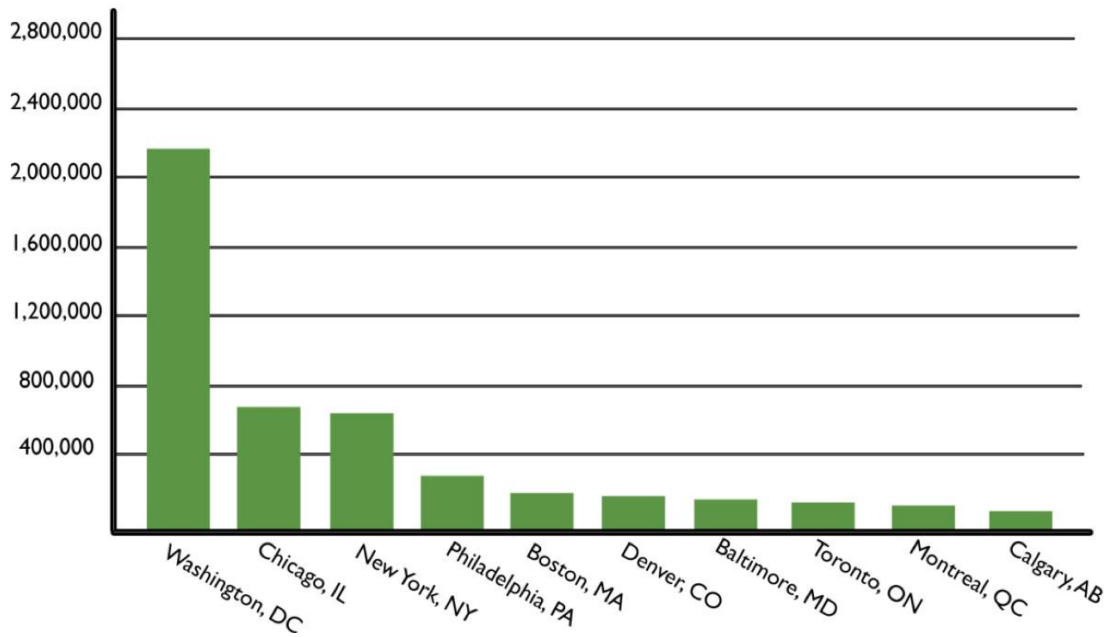


Figure 4.1 Palmarès des dix villes en Amérique du Nord ayant installé le plus de toits verts en 2013 en superficie (tiré de : *Green Roofs*, 2014, p.5)

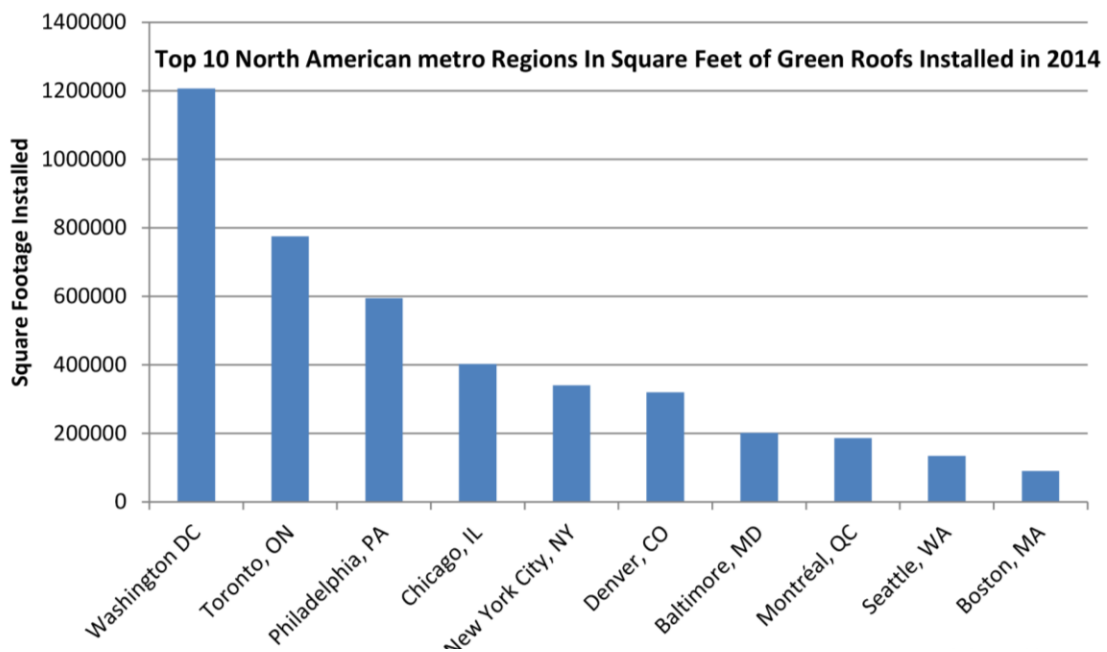


Figure 4.2 Palmarès des dix villes en Amérique du Nord ayant installé le plus de toits verts en 2014 en superficie (tiré de : *Green Roofs*, 2015, p.6)

De façon remarquable, la ville de Toronto est passée en 2013 d'une superficie d'environ 150 000 pieds carrés de toits verts installés à près de 800 000 pieds carrés de superficie de toiture végétalisée en 2014, soit un bond du huitième rang au deuxième rang dans le palmarès des toits verts en Amérique du Nord en une seule année. Il est ainsi intéressant d'étudier les politiques, programmes ou autres mesures qui ont été mis en place dans cette ville et qui ont favorisé cet essor.

La ville de Toronto a commencé à offrir, dans le cadre d'un programme pilote, en 2006 un incitatif financier de 10 \$ par mètre carré de toit vert installé jusqu'à un maximum de 20 000 \$ (Lawlor et al., 2006). Cet incitatif financier s'est vu bonifié depuis 2009 grâce au *Eco-Roof Incentive Program* de la ville de Toronto. En effet, ce programme, relevant de la Division de l'énergie et de l'environnement de cette ville, offre une aide financière de 75 \$ / m<sup>2</sup> pour les projets de toits verts éligibles jusqu'à un maximum de 100 000 \$ (City of Toronto, 2016b).

Par ailleurs, Toronto est la première ville en Amérique du Nord à avoir établi, au niveau réglementaire, l'obligation de construire un certain pourcentage de toits verts sur toutes nouvelles constructions. Les bâtiments de moins de six étages ou de moins de 20 mètres de hauteur sont toutefois exclus de cette réglementation. Le tableau suivant présente le pourcentage de toit devant faire l'objet de verdissement selon la surface brute de plancher du bâtiment pour toutes nouvelles constructions à compter du 31 janvier 2010 pour les secteurs résidentiels et commerciaux. Pour le secteur industriel, la réglementation est entrée en vigueur à compter du 30 avril 2012.

**Tableau 4.1 Pourcentage du toit devant être recouvert de verdure par réglementation municipale torontoise** (tiré de : *City of Toronto*, 2016)

Couverture de l'espace de toiture disponible (m <sup>2</sup> )	Couverture de l'espace de toiture disponible
2 000 – 4 999	20 %
5 000 - 9 999	30 %
10 000 14 999	40 %
15 000 19 999	50 %
20 000 et plus	60 %

La réglementation torontoise requiert que 20 à 60 % de la surface disponible du toit soit végétalisée pour tout bâtiment ayant une surface de plancher brute supérieure à 2 000 m<sup>2</sup>. Toutefois, il est possible d'être exempté de cette réglementation, sous acceptation du planificateur urbain en chef, moyennant la somme



de 200 \$ / m<sup>2</sup> de surface de toiture non conforme à ladite réglementation (*City of Toronto*, 2016). Notons également qu'outre les mesures réglementaires et les signaux financiers, Toronto a aussi joué un rôle clef dans la recherche sur la construction des toits verts dans le contexte torontois. Cette ville exige également que toutes les constructions de toits verts respectent le *Green Roof Construction Standards*, soit les standards de la construction des toits verts, tel que le veut l'article IV du code municipal (*Toronto Municipal Code*, 2013).

### **4.3 Paris et ses murs végétaux**

Telle une oasis au milieu d'un désert, les murs végétaux viennent raviver l'espace urbain — un milieu où la superficie des infrastructures grises surpasse généralement celle des infrastructures vertes et naturelles. Néanmoins, la végétalisation à la verticale (murs végétaux) ne bénéficie pas d'autant d'incitatifs ou de programmes permettant de favoriser son installation au même titre que la végétalisation horizontale comme les toits verts. Alors que la popularité grandissante des toits verts peut s'expliquer entre autres par des incitatifs d'ordres financiers, les murs végétaux, quant à eux, s'intègrent dans le paysage urbain par une approche beaucoup plus axée sur l'esthétisme et la participation citoyenne.

Les murs végétaux hydroponiques de Patrick Blanc représentent sans aucun doute l'une des formes de végétalisation à la verticale qui attirent le plus l'attention. Le Mur Végétal de Patrick Blanc grâce à la possibilité d'agencer la végétation en créant des effets de couleurs et de contrastes sans aucune contrainte de hauteur permet d'élever le mur végétal au titre d'une oeuvre d'art (Gobeille, 2012). Le botaniste Patrick Blanc n'est pas seulement un scientifique, il est aussi l'artiste français le plus connu derrière les murs végétaux avec des réalisations murales aux quatre coins du globe. Il est ainsi intéressant de traiter de ce qui se passe en France ou plus précisément à Paris en matière de verdissement des murs.

À Paris, les citoyens ont adopté la végétalisation à la verticale dans leur mode de vie urbaine. En septembre 2014, dans le cadre d'un vote sur un budget participatif de 25 M\$, les citoyens ont été appelés à choisir des projets pour améliorer leurs cadres de vie. Lors de ce vote, les Parisiens ont été nombreux à opter pour la végétalisation des murs. En fait, parmi les 15 projets proposés à la mairie de la ville concernant l'aménagement de l'espace public, la végétalisation des façades est arrivée largement en tête au sommet du palmarès des votes (Chesnais, 2014). Ainsi, 2,84 M\$ servira à la réalisation de 41 projets de murs végétaux à Paris dont les principaux se feront sur des façades publiques (ibid.). La figure ci-contre présente l'emplacement de ces projets :



**Figure 4.3 Emplacements des 41 projets de murs végétaux à réaliser à Paris (tiré de Lescurieux, 2015)**

Il est ainsi possible de constater un engouement dans la capitale de l'Île-de-France pour les murs végétaux. Comme le mentionne Pénélope Komitès, adjointe à la Mairesse de Paris : « les Parisiens ont montré qu'ils voulaient que la nature se propage, se diffuse et s'épanouisse dans l'espace public » (Lescurieux, 2015). Lorsqu'on laisse à la population la possibilité de choisir, comme il en est le cas dans cet exemple de vote sur un budget participatif, la nature peut faire partie des principales préoccupations des citoyens. « C'est du sérieux », affirme Pauline Véron, adjointe responsable de la démocratie participative (Lescurieux, 2015).

Bien que cela soit très intéressant, le même scénario pourrait difficilement se reproduire à court terme dans le contexte québécois. En effet, la végétalisation des murs en France a été fortement popularisée par l'inventeur même du Mur Végétal, soit Patrick Blanc. L'image ci-dessous présente une liste de quelques réalisations signées par ce dernier dans la région de la capitale française :



**Figure 4.4** Quelques réalisations de murs végétaux à Paris signée Patrick Blanc (tiré de Blanc, s. d.b)

D'autre part, le climat français offre la possibilité de planter des espèces végétales pouvant vivre dans un système à croissance hydroponique. Les connaissances actuelles en terme de végétaux pouvant résister au climat hivernal du Québec ne permettent pas l'utilisation de la technologie hydroponique pour verdir les murs extérieurs du Québec pour le moment. L'utilisation des plantes grimpantes ne permet pas de créer un effet esthétique aussi remarquable que l'utilisation de la technologie hydroponique à la verticale pour verdir les murs.

#### **4.4 Atlanta, la ville dans une forêt**

Pour tenter de contrer la déforestation, chaque année c'est un milliard d'arbres qui sont plantés dans le monde (Planetoscope, 2012). La plantation d'arbres constitue aussi l'une des formes les plus connues de verdissement urbain. Parmi les villes urbaines ayant un couvert forestier élevé, celle d'Atlanta en Georgia aux États-Unis mérite que l'on s'y attarde un peu plus attentivement puisqu'elle est surnommée « la ville dans une forêt » (Brown, 2011).

Possédant un indice de canopée, parmi les plus élevés, évalué à 48 % (*Trees Atlanta*, 2016a), la ville d'Atlanta en collaboration avec l'organisme à but non lucratif *Trees Atlanta* a mis en place un éventail de programmes permettant d'offrir à leurs citoyens et aux visiteurs un milieu de vie pourvu de végétation. En somme, ces programmes peuvent se résumer en trois mots, soit « planter », « conserver » et « éduquer ».

##### **4.4.1 Planter**

À Atlanta, les arbres ne sont pas « simplement plantés pour être plantés ». L'entretien ainsi que les soins accordés aux arbres sont nécessaires afin de s'assurer que les arbres aient une vie longue, certes, mais saine également (*Trees Atlanta*, 2016a). La plantation des arbres, bénéficiant de l'apport des citoyens, est suivie d'un audit de qualité échelonné sur une période de trois ans.

La première année constitue la phase durant laquelle les arbres nouvellement plantés nécessitent le plus d'entretien et de soins. Ainsi, une visite bimensuelle est effectuée afin d'offrir aux arbres les soins qu'ils requièrent, comme les arroser.

L'arrosage de jeunes arbres, bien que cela peut sembler à première vue une étape évidente en soi, n'est pas forcément une démarche qui est nécessairement appliquée de façon systématique à la suite des activités de plantation notamment au Québec. En effet, alors que la ville d'Atlanta se préoccupe des soins accordés aux arbres nouvellement plantés, il existe une autre conception de plantation d'arbres totalement en

opposition à celle-là. C'est le cas de la ville de Montréal. Lors du Sommet sur les infrastructures naturelles du grand Montréal qui s'est tenu au courant du mois de juin 2016, il a été suggéré par certains panélistes que la plantation d'arbres devrait nécessiter le moins d'entretien possible. L'une des raisons étant que si l'on plante la bonne espèce d'arbre au bon endroit, celui-ci ne requerra pas d'entretien de la part des humains. Aussi, il a été mentionné dans le cadre de ce Sommet que les gens sont trop occupés de nos jours pour aller en prendre soin. Notons que cela ne veut nécessairement dire qu'à Montréal, les gens ne prennent pas soin de leurs arbres nouvellement plantés. Certains peuvent également en prendre soin, mais il semble qu'une autre approche est aussi appliquée dans la ville de Montréal.

À Atlanta, c'est l'inverse qui se produit et d'ailleurs, en période de pluie peu abondante, la fréquence d'arrosage est augmentée à une fois tous les dix jours. Aussi, à raison de deux fois par année, les arbres reçoivent des engrais fertilisants afin de les aider à mieux s'enraciner et à croître. De plus, lorsque nécessaire, un traitement peut être effectué afin d'éliminer les agents pathogènes qui peuvent infecter les jeunes arbres en pousse (*Trees Atlanta*, 2016a).

Durant la deuxième année, l'inspection des arbres devient plus modérée. Une visite mensuelle est suffisante pour s'assurer que les arbres plantés sont en bonne santé à l'exception des arbres de rues. Puisque ceux-ci sont situés dans un milieu plus stressant notamment à cause de la pollution causée par les véhicules, les arbres de rues continuent de nécessiter les mêmes soins que lors de la première année de plantation. Les besoins en arrosage et en fertilisation demeurent les mêmes (*Trees Atlanta*, 2016a).

La surveillance des arbres devient moins intense au courant de la troisième année de plantation. Les arbres de rues nécessitent une inspection une fois tous les trois semaines. Les autres arbres, comme les arbres situés dans les parcs ou dans des espaces verts, ne requièrent que des visites saisonnières. Les besoins en arrosage et en fertilisation demeurent, une fois de plus, les mêmes (*Trees Atlanta*, 2016a).

#### **4.4.2 Conserver**

À Atlanta, la préservation de la forêt naturelle se fait à travers un programme appelé « *NeighborWoods* » créé en 2001 (*Trees Atlanta*, 2016b). Ce programme offre à la communauté les outils et les ressources nécessaires pour planter de nouveaux arbres, et développe des programmes éducatifs pour former des groupes visant à défendre l'intérêt des arbres. La ville d'Atlanta en partenariat avec le programme *NeighborWoods* finance également le *Free Yard Tree Program*. Le programme *Free Yard Tree* offre aux résidents de la ville jusqu'à trois arbres à planter gratuitement. Ces arbres doivent cependant obligatoirement être plantés devant la cour des propriétaires résidents de la ville (*Trees Atlanta*, 2016b).

Ainsi, l'on peut constater que la conservation des arbres ou des forêts urbains passe par la plantation et l'éducation. Il ne s'agit pas de planter pour augmenter seulement l'effectif des arbres, mais également pour compenser les arbres perdus. L'éducation joue un rôle central dans le succès du verdissement urbain, car c'est en étant mieux informé et mieux sensibilisé que les citoyens embarquent volontairement dans la plantation des arbres en milieu urbain. À Atlanta, les activités de plantation peuvent se faire par des groupes de taille considérable allant jusqu'à mobiliser un quartier pour planter des arbres et en prendre soin (*Trees Atlanta*, 2016a).

#### **4.4.3 Éduquer**

L'éducation joue un rôle central dans la mission de *Trees Atlanta* (*Trees Atlanta*, 2016c) pour informer et sensibiliser la population dans la ville de l'*Atlanta* à l'égard des arbres urbains. Il existe des programmes éducatifs tant pour les jeunes que pour les adultes à cet effet. Ces programmes sont adaptés pour les volontaires, les corporations de même que pour les groupes écoliers (ibid.). Les programmes éducatifs pour les jeunes sont également adaptés en fonction de l'âge des enfants et visent à offrir une expérience amusante permettant à ceux-ci d'adopter dès leurs jeunes âges une appréciation de ce qui les entoure (*Trees Atlanta*, 2016d). *Trees Atlanta* enseigne à qui le veut une gamme d'informations permettant d'augmenter les chances de réussites en matière de plantations d'arbres. Ainsi, les meilleures méthodes de plantations et d'entretiens des arbres sont enseignées ainsi que les techniques permettant de réduire les espèces invasives notamment. Le but commun des nombreux programmes éducatifs est de fournir à la communauté le savoir ainsi que les outils nécessaires pour mener à bien la restauration de même que la conservation des précieuses ressources naturelles — si essentielles sont-elles pour la qualité de vie de la communauté (*Trees Atlanta*, 2016c).

## 5. ESTIMATION DU POTENTIEL DE SÉQUESTRATION NATURELLE DE CARBONE EN MILIEU URBAIN AU QUÉBEC

Ce chapitre a pour but de quantifier le potentiel de séquestration naturelle de carbone en milieu urbain au Québec de manière sommaire. Pour y arriver, une brève description du contexte urbain du Québec sera effectuée avant de se lancer dans l'estimation du potentiel de séquestration de carbone. Les calculs relatifs aux estimations du potentiel de séquestration porteront principalement sur les toits verts, les murs végétaux et les arbres en milieu urbain. Notons qu'à l'égard des toits verts et des murs végétaux, les estimations du potentiel de séquestration se feront essentiellement à partir d'hypothèses pratiques. Quant aux arbres urbains, il est possible d'établir les données actuelles relativement à la séquestration de carbone par les arbres en milieu urbain au Québec avant de procéder à une analyse concernant le potentiel hypothétique de séquestration de carbone par ceux-ci.

### 5.1 Le contexte urbain du Québec de 1867 à aujourd'hui

À l'origine, le Québec s'était constitué d'un milieu de vie axé essentiellement sous une forme rurale. En 1867, la population rurale représentait 80 % de la population totale québécoise contre 20 % de la population qui vivait dans les pôles urbains. Cependant, le Québec a connu un exode de ce mode vie rurale vers le milieu urbain, si bien que la situation de l'occupation du territoire s'est inversée inversant le ratio 80:20 (rural/urbain) à 80 % urbain contre 20 % rural en l'espace d'un siècle (Proulx, 2002). Aujourd'hui, la population urbaine du Québec représente, selon les données de recensement de 2011, 81 % de la population totale du Québec (Statistique Canada, 2013). Un milieu urbain aussi appelé « centre de population » est défini comme étant « une région ayant une concentration démographique d'au moins 1 000 habitants et une densité de population d'au moins 400 habitants au kilomètre carré » (Statistique Canada, 2015)

Le Québec couvre une superficie de près de 1,7 million de km<sup>2</sup>, soit l'équivalent de trois fois la superficie de la France (Institut de la statistique du Québec, 2014). Cependant, à *contrario* de plusieurs pays européens dont les territoires habités occupent une bonne proportion de leurs superficies, la surface habitée du Québec ne représente qu'une faible part de sa superficie totale. En effet, le territoire habité du Québec ne représente que 110 000 km<sup>2</sup>, soit le cinquième de la superficie de la France (Solidarité rurale du Québec, 2016). La majorité de la population québécoise est concentrée sur les rives du Saint-Laurent, du Saguenay ainsi que de l'Outaouais.

## 5.2 Estimation du potentiel de séquestration de carbone par les toits verts

Le but de cette section est d'estimer le potentiel de séquestration de carbone par les toits verts. Pour parvenir à estimer ce potentiel de séquestration, il importe de déterminer la superficie totale des toits au Québec. La détermination de la superficie des toits résidentiels au Québec permettra éventuellement d'estimer le potentiel de séquestration de carbone par les toits verts dans le secteur résidentiel. Ensuite, une extrapolation d'ordre économique permettra de déterminer le potentiel de séquestration de carbone par les toits verts dans les secteurs institutionnels, commerciaux et industriels (ICI). Ce n'est qu'à la suite de la réalisation de ces étapes qu'il sera possible d'évaluer le potentiel de séquestration total de carbone par les toits verts au Québec

### 5.2.1 Détermination de la superficie des toits résidentiels au Québec

La première étape pour établir le potentiel de séquestration de carbone par les toits verts au Québec est de déterminer la superficie des toits résidentiels au Québec. Pour ce faire, dans un premier temps, une revue de la littérature a permis de déterminer le nombre de logements au Québec ainsi que la superficie moyenne de ces ménages. Le tableau suivant présente le nombre de constructions résidentielles au Québec selon les données de recensement de 2011 recueillies par Statistique Canada.

**Tableau 5.1 Type de construction résidentielle au Québec** (tiré de : Statistique Canada, 2016)

Type de construction résidentielle	Nombre de logements	%
Maison individuelle non attenante	1 560 405	46,0
Maison jumelée	171 435	5,0
Maison en rangée	86 040	2,5
Appartement, immeuble de cinq étages ou plus	171 110	5,0
Appartement, immeuble de moins de cinq étages	1 103 845	32,5
Appartement, duplex	263 860	7,8
Autre maison individuelle attenante	15 650	0,5
Logement mobile	23 000	0,7
<b>Total</b>	<b>3 395 345</b>	<b>100</b>



Au total, la population québécoise habite à l'intérieur de près de 3,4 millions de logements privés. Près de la moitié des bâtiments d'habitation est constituée de maisons individuelles non attenantes et près du tiers des constructions immobilières consiste en des immeubles de moins de cinq étages. Les autres types de constructions représentent environ 20 % des habitations (Statistique Canada, 2016). De plus, la superficie habitée des ménages canadiens occupe une moyenne de 128 m<sup>2</sup> (RNC, 2012). La superficie habitée des ménages étant en lien direct avec la superficie des toitures, celle-ci peut être estimée approximativement en fonction de la superficie des ménages puisque pour un mètre carré de superficie habitée, il y a au moins un mètre carré équivalent de superficie de toiture.

En réalité, en raison des pentes possibles des toits notamment, la superficie totale des toits devrait couvrir une superficie supérieure à la superficie habitée. Ce présent travail ne va cependant pas jusqu'à considérer ses aspects quant à l'estimation de la superficie des toits au Québec puisque les calculs à cet égard se veulent être prudents de façon à éviter de surévaluer le potentiel de séquestration de carbone. Ainsi, les calculs effectués dans ce présent essai s'avèrent être conservateurs quant à l'estimation du potentiel de séquestration de carbone par les toits vert au Québec. Le tableau suivant présente les calculs effectués afin d'établir ce que représente la superficie totale des toits au Québec.

**Tableau 5.2 Calculs estimant la superficie totale des toits résidentiels au Québec** (tiré de : Statistique Canada, 2016)

Type de construction résidentielle <sup>1</sup>	Nombre <sup>1</sup>	% <sup>1</sup>	FD	Superficie moyenne des toits par type de construction (m <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	Superficie totale des toits (m <sup>2</sup> )
	A		B	C = 128 m <sup>2</sup> / B	D = A x C
Maison individuelle non attenante	1 560 405	1. 46,0	2. 3	42,7	66 578 000
Maison jumelée	171 435	3. 5,0	4. 3	42,7	7 315 000
Maison en rangée	86 040	5. 2,5 6.	7. 3	42,7	3 671 000
Appartement, immeuble de cinq étages ou plus	171 110	8. 5,0	9. 15	8,5	1 460 000
Appartement, immeuble de moins de cinq étages	1 103 845	10. 32,5	11. 4	32,0	35 323 000
Appartement, duplex	263 860	12. 7,8	13. 3	42,7	11 258 000
Autre maison individuelle attenante	15 650	14. 0,5	15. 3	42,7	669 000
Logement mobile	23 000	16. 0,7	17. 1	128,0	2 944 000
<b>Total</b>	<b>3 395 345</b>	<b>100</b>	<b>3,9</b>	<b>32,7</b>	<b>129 216 000</b>

1. Tiré de Statistique Canada (2016)

2. La superficie moyenne par type de construction est estimée selon la superficie moyenne des ménages (inspiré de RNC. 2012)

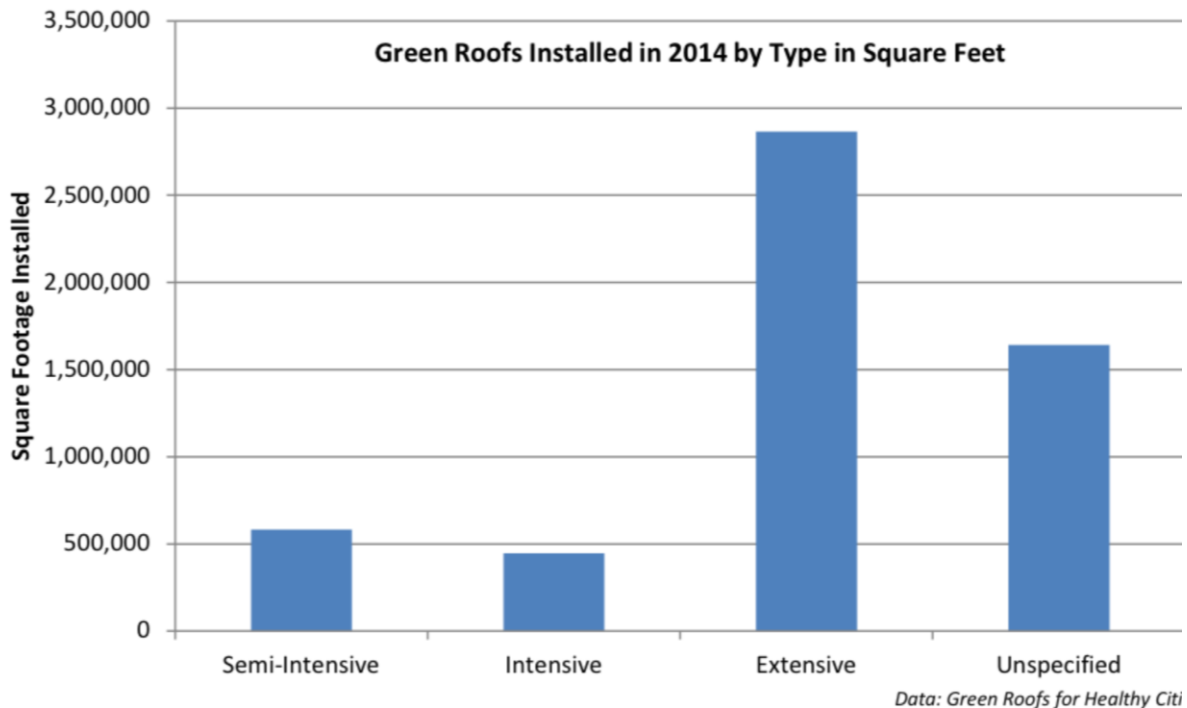
La méthode de calcul utilisé consiste à octroyer un facteur de division (FD, colonne B, tableau 5.2) à la superficie moyenne des ménages canadiens. Il est ainsi possible d'estimer la superficie moyenne des toits par ménage eu égard au type de construction des bâtiments au Québec en divisant la valeur moyenne de la superficie des ménages par le FD. Ensuite, le nombre de chacun des types de construction (colonne A,

tableau 5.2) est multiplié par la valeur correspondante à sa superficie moyenne des ménages. Cela permet d'obtenir la superficie totale des toits pour ce type de construction (colonne D, tableau 5.2). La somme de la superficie totale de chaque type de construction permet de déterminer la superficie totale des toits résidentiels au Québec.

Notons que la valeur du FD utilisé se veut conservatrice afin de s'assurer que les calculs en matière de potentielle séquestration de carbone par les toits verts ne soient pas surévalués. Ainsi, un FD de trois a été appliqué pour les types de constructions pouvant avoir un ou deux étages en temps normal, mais qui peuvent aussi dans des cas plus rares avoir plus de deux étages. Cela est le cas notamment pour les maisons individuelles non attenantes. Pour les immeubles de cinq étages ou plus, un FD subjectif de 15 a été octroyé de façon à rendre les calculs conservateurs en dépit du manque d'information sur le nombre d'étages que peuvent avoir les immeubles de plus de cinq étages. Pour les immeubles de moins de cinq étages un FD de quatre s'avère également prudent puisque cela consiste au nombre maximum d'étages pour ce type d'immeuble. Un FD d'un (1) est octroyé pour les constructions de logements mobiles puisque ceux-ci ne possèdent évidemment qu'un seul étage. En somme, selon les calculs effectués, la superficie totale des toits résidentiels est estimée à plus de 129 000 000 m<sup>2</sup> au Québec. Afin d'alléger les calculs, la surface totale des toits résidentiels au Québec est présumée couvrir une superficie de 130 000 000 m<sup>2</sup>. En fonction de cette donnée, il est possible d'estimer le potentiel de séquestration de carbone en effectuant des calculs relatifs à la quantité de séquestration de carbone que peut absorber un toit vert par type de technologies utilisées.

### **5.2.2 Détermination du potentiel de séquestration de carbone par les toits verts dans le secteur résidentiel**

En Amérique du Nord, les toits verts de type extensif sont les plus souvent utilisés pour verdir les toitures. Le graphique ci-dessous montre la superficie de végétalisation des toitures par type de technologie utilisé en 2014 en pieds carrés.



**Figure 5.1 Superficies installées par types de toits verts en 2014 en Amérique du Nord** (tiré de : Green Roofs, 2014, p. 5)

Les toitures extensives représentent environ 75 % de la superficie totale des toits verts en Amérique du Nord, alors que la superficie des toitures semi-intensives et intensives ensemble couvre environ le quart de la superficie des toitures végétalisées. La technologie extensive semble donc être la favorite lorsque vient le temps de verdir un toit, et cela peut s'expliquer par le fait que les toitures extensives sont plus facilement accessibles tant du point de vue financier que du point de vue de la réalisation technique notamment en termes de la capacité portante de poids de la structure du toit (Green Roofs, 2014). Étant donné que le Québec se situe en Amérique du Nord et que la documentation ne permet pas d'obtenir des informations similaires à l'égard des proportions de types de toits verts installés dans le territoire québécois, il apparaît raisonnable dans le cadre de ce travail d'appliquer pour le Québec les mêmes ratios que ceux obtenus pour l'Amérique du Nord dans les calculs visant à estimer le potentiel de séquestration de carbone au Québec par les toits verts.

Après avoir établi les variables concernant le pourcentage de type de toits verts intensifs, semi-intensifs et extensifs, il importe ensuite de déterminer les variables relatives aux taux de séquestration de carbone par type de toiture.

L'étude de Getter, Rowe, Robertson, Cregg et Andresen (2009) aux États-Unis a évalué à 0,375 kg C / m<sup>2</sup> / an le taux de séquestration de carbone par les toitures extensives. En ce qui concerne les toitures de type semi-intensif, une étude effectuée dans la ville de Chengdu en Chine a permis de déterminer que le taux de séquestration brute de carbone par des toits verts ayant des caractéristiques s'apparentant aux toits semi-intensifs peut représenter en moyenne 6,47 kg C / m<sup>2</sup> / an (Luo et al., 2015). Cependant, une note mentionne que ce taux de séquestration n'est pas nécessairement stable dans le temps étant donné que les expériences effectuées se sont déroulées sur quelques années seulement et pendant que la croissance des végétaux était grande. En outre, les auteurs chinois mentionnent qu'une baisse de séquestration de carbone est également attendue si l'on prolongeait l'expérience (ibid.). En effet, l'étude ne s'est pas échelonnée sur toute la durée de vie des végétaux sur le toit. Rappelons qu'en temps normal, le taux de séquestration de carbone par les végétaux cesse ou ralentit vers leurs fins de vies. Il n'est donc pas possible d'utiliser le taux de séquestration de 6,47 kg C / m<sup>2</sup> / an par les toits semi-intensifs sans adapter cette donnée au contexte québécois et sans évaluer aussi une moyenne de séquestration de carbone sur la durée de vie des végétaux.

### **5.2.3 Estimation du taux de séquestration de carbone par les toits verts semi-intensifs**

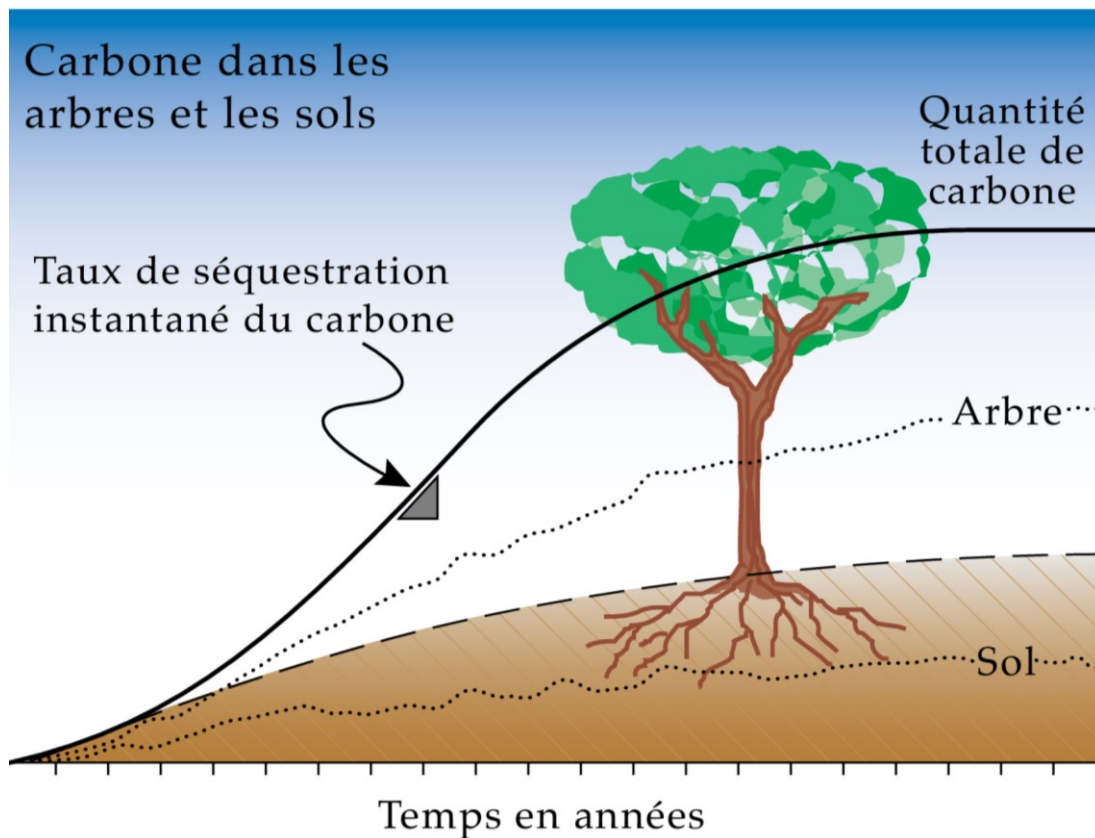
Afin de déterminer le taux de séquestration de carbone par les toits verts semi-intensifs, une analogie est effectuée entre la séquestration de carbone d'un arbre et la séquestration de carbone par les toits verts semi-intensifs. Ainsi, étant donné que le taux de séquestration de carbone des arbres varie d'une essence à l'autre et d'une région à une autre en raison notamment du contexte climatique et pluviométrique, il est de mise de transposer les données connues relatives à la séquestration de carbone par les arbres situés au Québec aux toits verts.

À cet effet, une simulation de calculs de séquestration de carbone par les arbres a été effectuée dans le « calculateur de carbone » d'Arbres Canada (2016) en prenant le soin d'utiliser les configurations correspondantes au contexte québécois. Le tableau suivant présente les résultats de la simulation effectuée, par l'auteur de l'essai, selon différentes essences d'arbres. En fait, cette simulation permet de déterminer le nombre d'arbres nécessaires, selon les types d'essences, pour séquestrer une tonne de carbone en 100 ans.

**Tableau 5.3 Nombre d'arbres nécessaires pour séquestrer une tonne de carbone en 100 ans**  
(compilation d'après : Arbres Canada, 2016)

Essences d'arbres	Nombre d'arbres
Cerisier de Virginie	6
Cerisier tardif	9
Épinette blanche	9
Épinette de Norvège	8
Frêne noir	7
Peuplier faux-tremble	10
Pin rouge	8
<b>Moyenne</b>	<b>8</b>

Les résultats de la simulation révèlent que le cerisier de Virginie possède la plus grande capacité de séquestration de carbone parmi les essences d'arbres évalués. En effet, il faut six cerisiers de Virginie ou dix peupliers faux-tremble pour séquestrer une tonne de carbone en un siècle. Le tableau révèle qu'en moyenne il faut planter huit arbres pour séquestrer une tonne de carbone en 100 ans. Ainsi, le taux de séquestration de carbone moyen d'un arbre est de 1,23 kg C / an selon la simulation effectuée à l'aide du calculateur de carbone d'Arbre Canada (2016). À titre indicatif, à l'échelle canadienne, la séquestration de carbone en milieu urbain se fait à un rythme de 2,5 kg C / an en moyenne sur une période de 80 ans (Roulet et Freedman, 2008). La valeur canadienne du taux de séquestration de carbone par arbre est supérieure à la moyenne québécoise, mais l'échelle du temps auquel le taux de séquestration est évalué est différente; le premier est évalué sur une période de 100 ans et le deuxième est évalué sur une période de 80 ans. Aussi, cette différence peut s'expliquer, en partie, par le fait que les arbres situés en Colombie-Britannique possèdent un taux de séquestration de carbone généralement plus élevé en raison notamment des conditions climatiques et des types d'essences d'arbres, comme les séquoias par exemple, qui favorisent un plus grand potentiel de croissance et de séquestration. Par ailleurs, selon Langlois, Blais et Bonneville (2004) du MAMOT, un arbre de trente ans, soit un arbre de taille relativement moyenne, séquestre 9,4 kg C / an en milieu urbain. Ainsi, il est possible de constater, comme le d'ailleurs Vergriete et Labrecque (2007), que les sources de données relativement aux taux de séquestration de carbone d'un arbre varient d'une source à l'autre. Selon Roulet et Freedman (2008), un arbre séquestre moins de carbone au début ainsi qu'à la fin de sa vie. La figure suivante présente la courbe du taux de séquestration instantanée de carbone au fil du temps pour un arbre, c'est-à-dire le taux de séquestration à un moment précis au courant de la vie d'un arbre.



**Figure 5.2 Courbe du taux instantané de séquestration de carbone d'un arbre dans le temps** (tiré de : Roulet et Freedman, 2008)

Afin d'adapter pour le Québec les données de Luo et al. (2015) en matière de séquestration de carbone pour les toits verts semi-intensifs, une analogie est effectuée entre la séquestration de carbone d'un arbre au cours de sa vie et la séquestration de carbone par les toits. En fait, l'on suppose que le taux de séquestration de carbone obtenu par Luo et al. (2015) pour les toits se fait à un rythme analogue à celui de la séquestration par un arbre moyen.

En résumé, il a été établi qu'un arbre séquestre 1,23 kg C / an au Québec. Cependant, le moment où le taux de séquestration de carbone est à son point maximum se produit lorsque l'arbre est d'âge moyen, soit à environ 30 ans. À ce moment, le taux de séquestration est évalué à 9,4 kg C / an. Ainsi, le taux moyen de séquestration de carbone correspond à 13 % du taux de séquestration de carbone maximal. Dans cette optique, l'on suppose que le même phénomène se produit pour la séquestration de carbone des toits verts. Dans un esprit conservateur, l'on présume que le taux de séquestration de carbone par les toits verts de

Luo et al. (2015) évalué à  $6,47 \text{ kg C} / \text{m}^2 / \text{an}$  correspond au moment où la séquestration de carbone est à son moment maximum.

Ainsi, un ratio de  $1,23 / 9,4$  (ou 13 %) est donc appliqué au taux de séquestration de carbone par les toits verts semi-intensifs de Luo et al. (2015) afin d'obtenir une estimation de la séquestration se faisant sur la durée de vie des végétaux sur le toit. Cela donne une valeur de séquestration de carbone d'environ  $0,85 \text{ kg C} / \text{m}^2 / \text{an}$  pour toute la durée de vie des végétaux sur le toit. Ainsi, aux fins de cet essai, il est estimé que le taux de séquestration de carbone des toits semi-intensifs se fait à un rythme de  $0,85 \text{ kg C} / \text{m}^2 / \text{an}$  au Québec. Ce taux de séquestration de carbone par les toits verts est considérablement plus faible que ce que suggèrent les études de Luo et al. (2015), mais contrairement à l'étude chinoise, le taux de  $0,85 \text{ kg C} / \text{m}^2 / \text{an}$  tient compte de la séquestration de carbone se produisant pendant toute la durée de vie des végétaux sur le toit.

Le tableau suivant présente les taux de séquestration de carbone utilisé dans le cadre de cet essai selon les types de toitures.

**Tableau 5.4 Taux de séquestration de carbone par type de toits verts** (tiré de : Getter et al., 2009, p. 7564)

Toits verts	Extensifs	Semi-intensifs	Intensifs
Taux de séquestration ( $\text{kg C} / \text{m}^2 / \text{an}$ )	0,375 <sup>1</sup>	0,85	0,85

1. Tiré de Getter et al. (2009)

Selon Whittinghill et al. (2014), plus l'épaisseur du substrat est grande, plus le potentiel de séquestration de carbone sur un toit vert est grand. Cela peut s'expliquer par le fait que plus l'épaisseur du substrat est grande, plus le toit peut accueillir une végétation de grande taille comme des plantes et des buissons pour les toitures semi-intensives, jusqu'à des arbustes et des arbres dans le cas des toitures intensives. En l'absence de données relativement au taux de séquestration de carbone d'un toit intensif, il est logique d'affirmer que la séquestration de carbone par un toit vert utilisant la technologie intensive est supérieure à la technologie semi-intensive puisque le substrat est plus épais sur un toit intensif. Cependant, en raison de l'absence de données à cet égard, il demeure prudent d'utiliser une valeur conservatrice du taux de séquestration de carbone à l'égard des toits intensifs. Ainsi, la valeur du taux de séquestration de carbone utilisée dans ce présent travail relativement aux toits intensifs est de  $0,85 \text{ kg C} / \text{m}^2 / \text{an}$ , soit la même valeur du taux de séquestration que son homologue utilisant la technologie semi-intensive.



Le tableau suivant présente le calcul pour estimer le potentiel maximal de séquestration de carbone par les toits verts au Québec si la totalité des toits résidentiels était végétalisée.

**Tableau 5.5 Potentiel estimatif maximal de séquestration de carbone par les toits verts résidentiels au Québec** (inspiré de : Statistique Canada, 2016 et tiré de : Getter et al., 2009)

Toits verts	Superficie maximale (m <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	Taux de séquestration (kg C / m <sup>2</sup> / an)	Potentiel maximal de séquestration de carbone (kg C / an)	Potentiel de séquestration de CO <sub>2</sub> (tonnes de CO <sub>2</sub> / an)
	A	B	C = A x B	D = C / 1000 x 44 / 12
Toits extensifs	97 500 000	0.375 <sup>2</sup>	36 562 500	134 000
Toits semi-intensifs et intensifs	32 500 000	0.85	27 625 000	101 000
<b>Total</b>	<b>130 000 000</b>	<b>0.5</b>	<b>64 188 000</b>	<b>235 000</b>

1. Inspiré de Statistique Canada (2016)

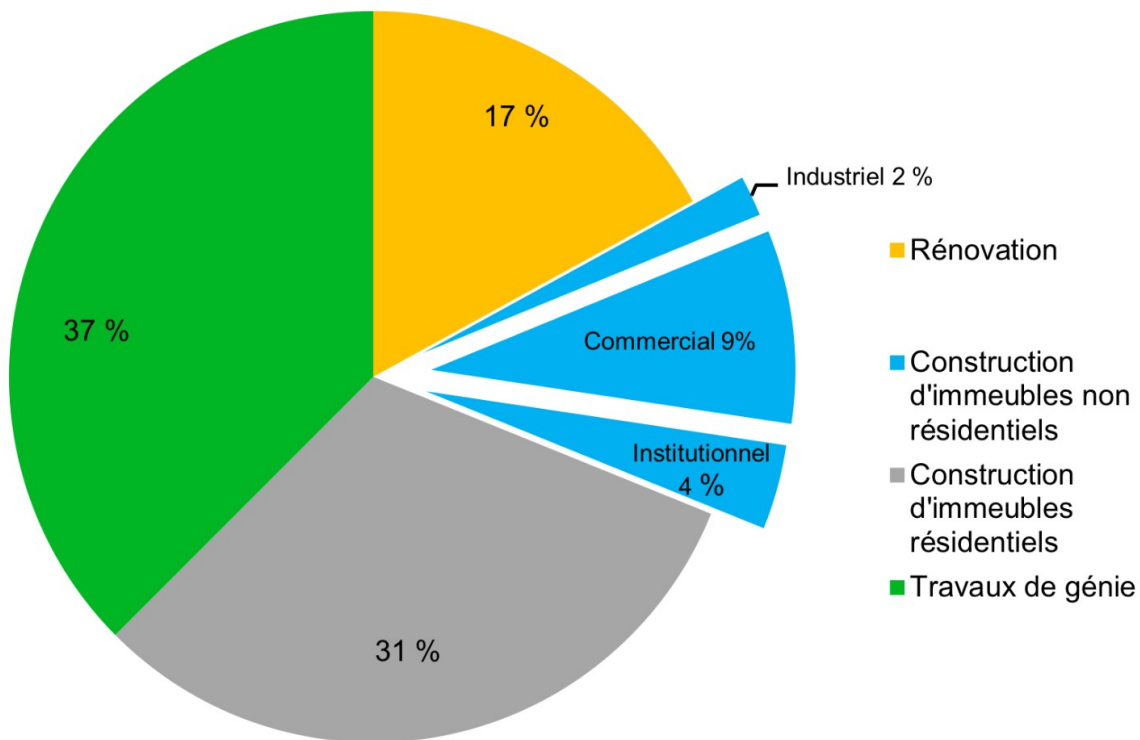
2. Tiré de Getter et al. (2009)

Puisqu'il a été établi précédemment que la superficie des toits au Québec couvre environ 130 millions de mètres carrés (130 km<sup>2</sup>) et que le pourcentage des toits extensifs installés en Amérique du Nord est d'environ 75 %, il est possible de déterminer, en fonction du taux de séquestration par type de toiture, que le potentiel maximal de séquestration de carbone au Québec s'avère être plus de 64 millions de kilogrammes de carbone par année ou plus 64 000 t C / an. Cela correspond à une absorption de plus de 235 000 tonnes de CO<sub>2</sub> / an. Peut-être qu'un jour, la totalité des toits sera verte... cependant, le pays qui possède le plus de toits végétalisés actuellement est l'Allemagne avec plus de 10 % de ses toits végétalisés. Ainsi, si le Québec réussissait à se comparer à l'Allemagne d'ici les prochaines décennies, la quantité de CO<sub>2</sub> séquestré par les toits verts serait de l'ordre de 20 000 tonnes de CO<sub>2</sub> / an.

« En 2013, les émissions totales de GES au Québec se chiffraient à 81,2 Mt éq. CO<sub>2</sub> » (MDDELCC, 2013) dont 77,7 % sont associées au CO<sub>2</sub>. Ainsi, les émissions de CO<sub>2</sub> étaient de 63 Mt de CO<sub>2</sub> en 2013 au Québec et chaque habitant émettait en moyenne dix tonnes de GES (MDDELCC, 2013). Si la totalité de la superficie des toits résidentiels au Québec était végétalisée, le potentiel de séquestration de carbone permettrait de compenser près de 0,4 % des émissions totales de dioxyde de carbone québécois.

#### 5.2.4 Détermination de la superficie des toits non résidentiels au Québec

En ce qui concerne le secteur non résidentiel, c'est-à-dire les secteurs ICI, le graphique suivant montre la part économique du secteur de la construction en 2014 au Canada incluant les secteurs résidentiels et non résidentiels. Ainsi, le graphique permet de comparer les activités économiques du secteur résidentiel avec ceux du secteur non résidentiel. Cela permettra sous peu d'estimer la superficie des toits non résidentiels en le comparant au secteur résidentiel. Les détails des explications relatives à cela seront détaillés sous peu.



**Figure 5.3 Part économique du secteur de la construction en 2014** (tiré de : Groupe Banque TD, 2015, p. 2)

La figure ci-dessus, tirée d'une analyse économique réalisée par le Groupe Banque TD, illustre qu'en 2014, au Canada, les constructions d'immeubles résidentiels représentaient 31 % de la part économique du secteur de la construction et les constructions d'immeubles non résidentiels représentaient 15 % de ce total, dont 2 % était attribuable au secteur industriel, 9 % au secteur commercial et 4 % au secteur institutionnel. Les autres activités dans le secteur de la construction consistent en des travaux de rénovation ou de génie. Les travaux de génie sont surtout en lien avec les activités gazéifières, le transport, l'électricité ainsi que

l'extraction minière (Groupe Banque TD, 2015). Ainsi, ceux-ci n'entrent pas en ligne de compte dans le calcul estimant la superficie totale des toits au Québec puisqu'ils ne sont pas en lien direct avec les toitures. Quant aux activités de rénovation, la documentation disponible ne permet de déterminer les proportions entre les activités en lien avec la rénovation résidentielle ou non résidentielle. Ainsi, les activités économiques en lien avec les travaux de rénovation n'entrent pas non plus en ligne de compte dans le présent calcul.

Ce graphique peut permettre d'estimer la superficie des toits du secteur non résidentiel, c'est-à-dire les secteurs institutionnels, commerciaux et industriels. Pour ce faire, trois hypothèses sont émises :

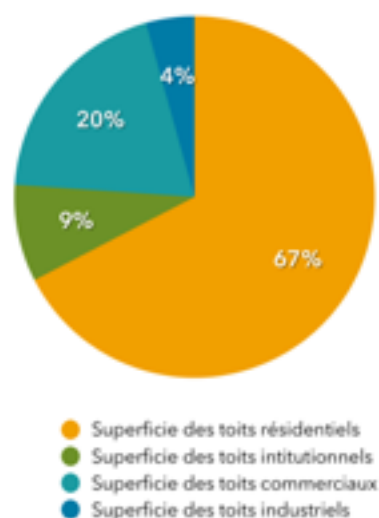
1. La part économique du secteur de la construction résidentiel et des ICI au Québec est similaire à celle du Canada.
2. Un dollar investi dans le secteur des ICI permet de produire globalement le même nombre de mètres carré de toiture que dans le secteur résidentiel.
3. La proportion de la superficie des toits est proportionnelle aux proportions respectives des parts économiques du secteur de la construction

Puisque la part du marché résidentiel (31 %) est d'environ deux fois supérieures au marché de la construction des ICI (15 %), il est permis d'estimer que la superficie des toits du secteur non résidentiel couvre une superficie équivalente à environ la moitié de la superficie des toitures résidentielles au Québec. Le tableau et graphique suivant montrent la superficie totale estimée des toitures québécoises.

**Tableau 5.6 Superficie totale estimée des toits par secteur**

(inspiré de : Groupe Banque TD, 2015)

Superficie des toits par secteur	Superficie (km <sup>2</sup> )
Superficie des toits résidentiels	130
Superficie des toits institutionnels	17
Superficie des toits commerciaux	38
Superficie des toits industriels	8
<b>Total</b>	<b>193</b>



**Figure 5.4 Pourcentage de la superficie estimée des toits par secteur** (inspiré de : Groupe Banque TD, 2015)

Le graphique ci-dessus, à droite, montre que le secteur résidentiel couvre les deux tiers de la superficie totale de toiture au Québec, alors que le secteur des ICI couvre le tiers restant. Les toits du milieu institutionnel couvrent une superficie d'environ 17 km<sup>2</sup>, ceux du milieu commercial couvrent environ 38 km<sup>2</sup> et ceux du milieu industriel couvrent environ huit km<sup>2</sup> pour un total de près de 63 km<sup>2</sup> pour les secteurs ICI.

#### **5.2.5 Détermination du potentiel de séquestration totale de carbone par les toits verts au Québec**

Les toitures résidentielles et ICI couvrent au total une surface de près de 200 km<sup>2</sup> ou plus précisément environ 193 km<sup>2</sup>. Le tableau suivant permet de rendre compte du potentiel de séquestration de carbone total des toits verts au Québec en incluant les secteurs résidentiels et ICI.

**Tableau 5.7 Potentiel estimé de séquestration totale de carbone par les toits** (inspiré de : Groupe Banque TD, 2015)

Secteur	Pourcentage <sup>1</sup>	Superficie maximale (m <sup>2</sup> )	Taux de séquestration (kg C / m <sup>2</sup> / an)	Potentiel de séquestration de carbone (kg C / an)	Potentiel de séquestration de CO <sub>2</sub> (tonnes de CO <sub>2</sub> / an)
		A	B	C = B x A	D = C / 1000 x 44 / 12
<b>Résidentiel</b>					
Toits extensifs résidentiels	51 %	97 500 000	0.375	36 563 000	134 000
Toits semi-intensifs et intensifs résidentiels	17 %	32 500 000	0.85	27 625 000	101 000
<b>Total résidentiel</b>	<b>67 %</b>	<b>130 000 000</b>	<b>0.5</b>	<b>64 188 000</b>	<b>236 000</b>
<b>ICI</b>					
Secteur institutionnel	9 %	16 774 000	0.5	8 282 000	30 000
Secteur commercial	20 %	37 742 000	0.5	18 635 000	68 000
Secteur industriel	4 %	8 387 000	0.5	4 141 000	15 000
<b>Total ICI</b>	<b>33 %</b>	<b>62 903 000</b>	<b>0.5</b>	<b>31 058 000</b>	<b>114 000</b>
<b>Grand total</b>	<b>100 %</b>	<b>192 903 000</b>	<b>0.5</b>	<b>95 246 000</b>	<b>349 000</b>

1. Inspiré de Groupe Banque TD (2015)

Selon les résultats des calculs du tableau ci-dessus, un toit vert moyen séquestre environ 0,5 kg C / m<sup>2</sup> / an. Cette valeur a été obtenue en effectuant une moyenne pondérée du taux de séquestration de carbone des toits extensifs avec les toits semi-intensifs et intensifs, et ce, en fonction du pourcentage d'installation de ces types de toits en Amérique du Nord.

Notons qu'en réalité, les secteurs ICI semblent posséder une proportion de toitures utilisant les technologies semi-intensives ou intensives supérieure à la moyenne en raison d'une capacité portante de la structure qui est généralement plus élevée dans les secteurs ICI. Cependant en raison d'une littérature peu

abondante à l'égard de la séquestration de carbone par les toits verts intensifs, une valeur du taux de séquestration de carbone de  $0,5 \text{ kg C} / \text{m}^2 / \text{an}$  a donc été accordée aux toits intensifs dans ce présent travail pour les secteurs institutionnels, commerciaux et industriels.

La prise en considération de la superficie des toits du secteur résidentiel et des ICI permet de déterminer que le potentiel maximal de séquestration de carbone au Québec s'avère être près de 100 millions de kilogrammes de carbone par année ( $100\,000 \text{ t C} / \text{an}$ ). Cela représente une absorption frôlant les 350 000 tonnes de  $\text{CO}_2$  par année. Rappelons que l'équivalent carbone en termes de  $\text{CO}_2$  est établi en utilisant le ratio 44/12, soit la masse molaire du  $\text{CO}_2$  divisée par la masse molaire du carbone.

Si le Québec réussissait à atteindre 15 % de ce potentiel théorique, lequel serait probablement atteignable d'ici les prochaines décennies, la quantité de  $\text{CO}_2$  séquestré par les toits verts serait d'environ 50 000 tonnes de  $\text{CO}_2 / \text{an}$ . Si la totalité de la superficie des toits résidentiels et non résidentiels (ICI) au Québec était végétalisée, le potentiel de séquestration maximale de carbone par les toits verts permettrait de compenser 0,6 % des émissions totales de dioxyde de carbone québécois.

### **5.3 Estimation du potentiel de séquestration de carbone par les murs végétaux**

Pour parvenir à estimer le potentiel de séquestration de carbone par les murs végétaux au Québec, il importe, dans un premier temps, de déterminer approximativement la surface ou la superficie totale que représentent les façades au Québec. Ensuite, la deuxième étape consiste à déterminer la quantité de carbone que peut séquestrer un mètre carré de mur végétal, et ce, par le biais d'une revue de la littérature.

L'estimation de la superficie totale des murs au Québec n'a jamais fait l'objet d'une étude dans la littérature scientifique. La connaissance de cette donnée est essentielle si l'on veut pouvoir estimer le potentiel de séquestration de carbone par les murs végétaux au Québec. Ainsi, pour parvenir à estimer le nombre de mètres carrés que représentent les façades au Québec, il s'est avéré nécessaire d'établir des liens entre quelques études pertinentes. Dans un premier temps, une estimation de la superficie des murs résidentiels a été effectuée avant d'estimer la superficie totale des façades des milieux institutionnels, commerciaux et industriels. La somme de la surface des secteurs résidentiels et ICI permet d'établir la superficie totale des toits au Québec.

### 5.3.1 Détermination de la superficie des murs résidentiels au Québec

Afin d'estimer la superficie des murs résidentiels au Québec, il convient de reprendre le tableau sur les types de constructions résidentielles au Québec.

**Tableau 5.8 Types de constructions résidentielles au Québec** (tiré de : Statistique Canada, 2016)

Type de construction résidentielle	Nombre de logements	%
Maison individuelle non attenante	1 560 405	46,0
Maison jumelée	171 435	5,0
Maison en rangée	86 040	2,5
Appartement, immeuble de cinq étages ou plus	171 110	5,0
Appartement, immeuble de moins de cinq étages	1 103 845	32,5
Appartement, duplex	263 860	7,8
Autre maison individuelle attenante	15 650	0,5
Logement mobile	23 000	0,7
<b>Total</b>	<b>3 395 345</b>	<b>100</b>

Il importe de noter que le tableau 5.8 ci-dessus donne des informations relatives au nombre de logements existant au Québec. Tel que discuté dans la section 5.2.1, il peut y avoir plusieurs logements dans une bâtisse. De plus, certains bâtiments, comme les maisons individuelles non attenantes, sont construits de façon distincte, c'est-à-dire sans qu'il y ait de murs mitoyens avec un autre bâtiment. D'autres bâtiments peuvent avoir des murs mitoyens comme les maisons faites en rangées. D'autre part, lorsqu'un bâtiment est construit de façon distincte, l'on peut supposer que la présence d'un toit requiert la présence de quatre murs. Le tableau suivant, en reprenant les données de la colonne sur la superficie totale des toits par type de construction, permet d'estimer la superficie des façades en fonction d'un facteur multiplicatif (FM) de quatre. Vergriete et Labrecque (2007) estiment que le potentiel de verdissement des murs au global s'avère être quatre fois supérieur à la superficie des toits. La valeur du FM est ainsi fixée à quatre selon cette donnée. Cette hypothèse ne s'avère pas forcément juste pour chaque type de construction puisque par exemple les immeubles de plus de cinq étages possèdent de toute évidence un FM supérieur à 4, alors que d'autres comme les maisons jumelées peuvent posséder un FM plus faible. Néanmoins, il est difficile de

fixer un FM qui convient pour chaque type de construction puisque plus la taille (largeur  $\times$  hauteur) des immeubles est petite, plus il y a de murs à végétaliser en fonction du nombre de logements. À l'opposé, plus la taille de l'immeuble est grande, moins il y a de la place pour végétaliser les murs puisque ce bâtiment engloberait plus de logements à lui seul et cela se traduit par des surfaces murales moins grandes en fonction du nombre de logements, comparativement aux petits bâtiments. En fait, cela a pour effet d'avoir globalement moins de murs pour le même nombre de logements. La documentation, peu abondante sur ce sujet, ne permet pas non plus d'avoir une idée de la taille moyenne des immeubles par types de constructions.

Ainsi, à des fins de simplifications, il est permis dans le cadre de cet essai de présumer que globalement, le résultat final des calculs serait semblable en appliquant un FM de quatre partout en apposition à si l'on réussissait à établir un FM pour chaque type de construction. Ainsi, en multipliant la superficie totale des toits par quatre, l'on obtiendrait une valeur approximative de la superficie totale des façades verticales selon ce que suggèrent Vergriete et Labrecque (2007). Le tableau suivant, en reprenant les valeurs estimées de la superficie des toits par type de construction, permet de calculer sommairement la superficie totale des murs résidentiels au Québec.



**Tableau 5.9 Calculs estimant la superficie totale des murs résidentiels au Québec** (inspiré de : Statistique Canada, 2016, p. 1 et tiré de : Vergriete et Labrecque, 2007, p. 4)

Type de construction résidentielle <sup>1</sup>	Nombre de logements <sup>1</sup>	Superficie totale des toits estimée (m <sup>2</sup> )	FM <sup>2</sup>	Superficie totale des murs (m <sup>2</sup> )
Maison individuelle non attenante	1 560 405	66 577 000	4	266 309 000
Maison jumelée	171 435	7 315 000	4	29 258 000
Maison en rangée	86 040	3 671 000	4	14 684 000
Appartement, immeuble de cinq étages ou plus	171 110	1 460 000	4	5 841 000
Appartement, immeuble de moins de cinq étages	1 103 845	35 323 000	4	141 292 000
Appartement, duplex	263 860	11 258 000	4	45 032 000
Autre maison individuelle attenante	15 650	668 000	4	2 671 000
Logement mobile	23 000	2 944 000	4	11 776 000
<b>Total</b>	<b>3 395 345</b>	<b>129 000</b>	<b>4</b>	<b>516 863 000</b>

1. Tiré de Statistique Canada (2016)

2. Tiré de Vergriete et Labrecque (2007)

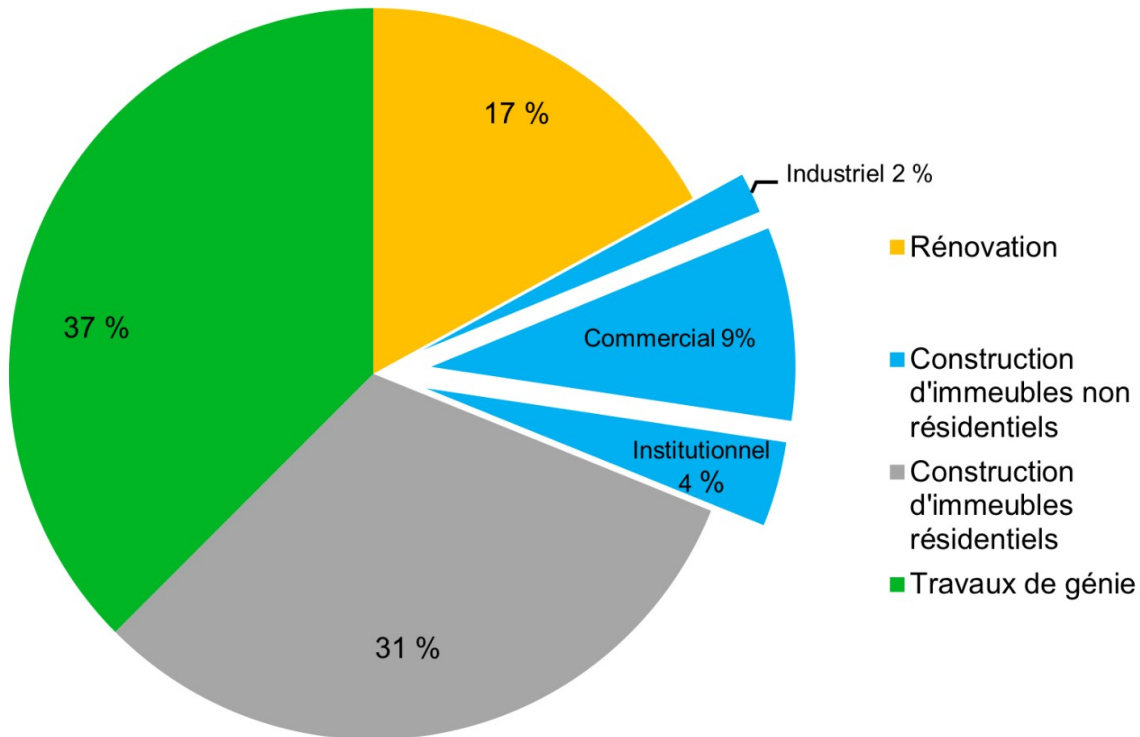
En somme, selon les hypothèses retenues et les calculs effectués, la superficie totale des murs résidentiels est estimée à plus de 500 000 000 m<sup>2</sup> au Québec. Cela représente la superficie maximale pouvant faire l'objet de végétalisation murale au Québec dans le secteur résidentiel.

### 5.3.2 Détermination de la superficie des murs résidentiels et ICI au Québec

Si l'on inclut les secteurs ICI, de la même manière que ce qui avait été fait pour estimer la superficie des toits ICI, il faut utiliser un ratio de 15/31, c'est-à-dire que la superficie des façades des secteurs ICI représenterait près de la moitié de la superficie des façades résidentielles. En fait, le facteur 15/31 provient

d'une analyse portant sur les proportions des activités économiques du secteur de la construction résidentielle ainsi que non résidentielle. Le texte qui suit présente cette analyse.

Reprenons le graphique suivant portant sur les activités économiques du secteur résidentiel et non résidentiel. Ce graphique permettra d'estimer la superficie des murs non résidentiels en le comparant au secteur résidentiel. Les détails des explications relatives à cela seront détaillés sous peu.



**Figure 5. 5 Part économique du secteur de la construction en 2014** (tiré de : Groupe Banque TD, 2015, p. 2)

La figure ci-dessus, tirée d'une analyse économique réalisée par le Groupe Banque TD, illustre qu'en 2014, au Canada, les constructions d'immeubles résidentiels représentaient 31 % de la part économique du secteur de la construction et les constructions d'immeubles non résidentiels représentaient 15 % de ce total, dont 2 % était attribuable au secteur industriel, 9 % au secteur commercial et 4 % au secteur institutionnel. Les autres activités dans le secteur de la construction consistent en des travaux de rénovation ou de génie. Les travaux de génie sont surtout en lien avec les activités gazéifières, le transport, l'électricité ainsi que l'extraction minière (Groupe Banque TD, 2015). Ainsi, ceux-ci n'entrent pas en ligne de compte dans le calcul estimant la superficie totale des toits au Québec puisqu'ils ne sont pas en lien direct avec les

toitures. Quant aux activités de rénovation, la documentation disponible ne permet de déterminer les proportions entre les activités en lien avec la rénovation résidentielle ou non résidentielle. Ainsi, les activités économiques en lien avec les travaux de rénovation n'entrent pas non plus en ligne de compte dans le présent calcul.

La figure 5.5 peut permettre d'estimer la superficie des toits du secteur non résidentiel, c'est-à-dire les secteurs institutionnels, commerciaux et industriels. Pour ce faire, trois hypothèses sont émises de façon similaire aux hypothèses effectuées en lien avec les toits verts :

1. La part économique du secteur de la construction résidentiel et des ICI au Québec est similaire à celle du Canada.
2. Un dollar investi dans le secteur des ICI permet de produire globalement le même nombre de mètres carré de murs que dans le secteur résidentiel.
3. La proportion de la superficie des murs est proportionnelle aux proportions respectives des parts économiques du secteur de la construction

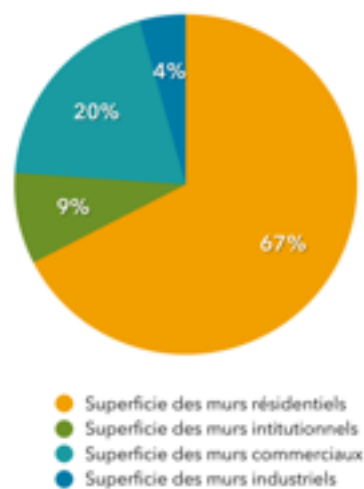
Puisque la part du marché résidentiel (31 %) est d'environ deux fois supérieures au marché de la construction des ICI (15 %), il est permis d'estimer que la superficie des murs du secteur non résidentiel couvre une superficie équivalente à environ la moitié de la superficie des murs résidentiels au Québec.

Le tableau suivant présente la superficie totale estimée des murs au Québec incluant les secteurs résidentiels et ICI.

**Tableau 5.10 Superficie totale estimée des murs au Québec** (inspiré de : Groupe Banque TD, 2015)

Superficie des murs par secteur	Superficie km <sup>2</sup>
Superficie des murs résidentiels <sup>1</sup>	517
Superficie des murs institutionnels	67
Superficie des murs commerciaux	150
Superficie des murs industriels	33
<b>Total</b>	<b>767</b>

1. La superficie des murs résidentiels a été calculée au tableau précédent



**Figure 5.6 Pourcentage des superficies estimées des murs par secteur au Québec** (inspiré de : Groupe Banque TD, 2015)

Ainsi, l'on peut estimer à 767 km<sup>2</sup> la superficie totale des murs au Québec dont 250 km<sup>2</sup> de murs est attribuable aux secteurs ICI, soit 67 km<sup>2</sup> dans le secteur institutionnel, 159 km<sup>2</sup> dans le secteur commercial et 33 km<sup>2</sup> attribuables au secteur industriel. En fonction de ces résultats, il est possible d'estimer le potentiel de séquestration de carbone en effectuant des calculs relatifs à la quantité de séquestration de carbone que peut absorber un mètre carré de mur végétal.

### 5.3.3 Détermination du potentiel de séquestration de carbone des murs végétaux au Québec

Puisque 20 m<sup>2</sup> de mur végétal séquestre autant de carbone qu'un arbre de taille moyenne (Green Over Grey, 2009), il est possible d'estimer que 20 m<sup>2</sup> de mur végétal séquestre environ 9,4 kg C / an, soit le taux de séquestration de carbone d'un arbre de 30 ans ayant une taille relativement moyenne. Autrement dit, un mètre carré de mur végétal séquestre le carbone à un rythme de 0,47 kg de carbone par année.

Le tableau suivant présente le calcul estimant le potentiel maximal de séquestration de carbone par les murs végétaux au Québec si la totalité des murs était végétalisée.

**Tableau 5.11 Potentiel maximal de séquestration de carbone au Québec par les murs végétaux** (inspiré de : Statistiques Canada, 2016, du Groupe de Banque TD, 2015 et adapté de : Grey, 2009)

Mur végétal	Superficie maximale (m <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	Taux de séquestration (kg C / m <sup>2</sup> / an) <sup>2</sup>	Potentiel maximal de séquestration de carbone (kg C / an)	Potentiel de séquestration de CO <sub>2</sub> (tonnes de CO <sub>2</sub> / an)
	A	B	C = A x B	D = C / 1000 x 44 / 12
Résidentiel	516 863 000	0.47	242 926 000	891 000
Institutionnel	66 692 000	0.47	31 346 000	115 000
Commercial	150 057 000	0.47	70 527 000	259 000
Industriel	33 346 000	0.47	15 673 000	57 000
<b>Total</b>	<b>766 958 000</b>	<b>0.47</b>	<b>360 470 000</b>	<b>1 322 000</b>

1. Inspiré de Statistiques Canada (2016) et du groupe de Banque TD (2015)

2. Adapté de Grey (2009)

Ainsi, selon les résultats de ce tableau, si la totalité des façades était végétalisée au Québec, soit une surface totalisant près de 767 km<sup>2</sup>, les murs végétaux ont un potentiel de séquestrer plus de 360 millions de kilogramme de carbone par année ou plus de 1,3 million de tonnes de CO<sub>2</sub> / an. Ce potentiel de

séquestration de carbone par les murs végétaux permettrait de compenser deux pour cent des émissions annuelles totales de dioxyde de carbone québécois.

#### **5.4 La séquestration de carbone par les arbres urbains**

Depuis l'entrée en vigueur, en 1994, de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements climatiques (CCNUCC), le Canada doit notamment, en raison de ses engagements en lien avec la Convention, fournir aux Nations Unies des données relatives aux gaz à effet de serre (Gouvernement du Canada, 2015). Ainsi, Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) effectue des estimations sur les émissions et la séquestration de GES à l'échelle du pays. Les données à cet égard sont par la suite soumises aux Nations Unies sur une base annuelle dans le cadre de la CCNUCC (Pasher, McGovern, Khoury et Duffe, 2014). Afin d'aider les instances gouvernementales à effectuer leurs inventaires de GES, le GIEC a établi un guide sur les lignes directrices à suivre pour établir les inventaires nationaux des gaz à effet de serre. La version la plus récente du guide se nomme les *Lignes directrices 2006 relatives aux inventaires nationaux des gaz à effet de serre*. Approuvées en 2006, ces Lignes directrices s'avèrent être un document de référence en matière de production d'une évaluation de qualité concernant les estimations des émissions et du retrait de gaz à effet de serre à l'échelle nationale (GIEC, 2006).

Pasher et al. (2014) ont effectué des estimations sur le stock et la séquestration de carbone par les forêts urbaines à travers le Canada, et ce, en se basant notamment sur les données d'ECCC relatives aux GES et en améliorant la précision des estimations par des techniques d'imagerie haute définition *QuickBird*, lequel offre un rendu d'image d'une précision de 60 cm de résolution. En outre, Pasher et al. (2014) ont intégré les Lignes directrices 2006 du GIEC relatives aux inventaires nationaux des gaz à effet de serre puisque les données d'ECCC ne suivaient pas nécessairement ce protocole (ibid.). En fait le but des travaux de Pasher et al. (2014) étaient d'augmenter la qualité et le niveau de précision des estimations à l'égard de la séquestration de carbone par les forêts urbaines canadiennes. Les résultats de l'étude sont les suivants : il est estimé que les forêts urbaines du Canada contiennent une réserve d'environ 34 millions de tonnes de stock de carbone. Le taux de séquestration du carbone de l'ensemble des arbres urbains au Canada est de 2,5 millions de tonnes de carbone annuellement. Il convient de mentionner que ces résultats sont basés sur la séquestration de carbone au-dessus du niveau du sol par les forêts urbaines à travers le Canada (Pasher et al., 2014).

Il importe également de mentionner qu'il est pratiquement impossible d'évaluer la canopée des arbres en analysant 100 % des arbres compte tenu des contraintes de temps et financiers. Ainsi, Environnement et Changement climatique Canada a établi un périmètre de réconciliation ou le « *Reconciliation Unit* » (RU)

englobant 97 % de la superficie urbaine canadienne et 99 % de la population urbaine canadienne. À l'échelle canadienne, il y a 947 centres de populations urbaines. De ce nombre, seulement 86 ont été retenus afin de procéder à une étude exhaustive quant à la séquestration de carbone par les arbres en milieu urbain. Ces 86 centres représentent une superficie urbaine de 16 300 km<sup>2</sup>, soit 67 % de la superficie urbaine totale canadienne. Au Canada, seulement 0,25 % du territoire est considéré comme étant urbain, soit 24 200 km<sup>2</sup> (Pasher et al., 2014).

Pour en ce qui en est du côté du Québec, il est possible de reprendre certaines données de l'étude de Pasher et al. (2014) pour procéder à une estimation du potentiel de séquestration de carbone par les arbres urbains au Québec. Dans un premier temps, il est opportun de déterminer l'indice de canopée de la couverture des arbres en milieu urbain. L'indice de canopée arboré (ICA) correspond au pourcentage de la couverture arborescente d'un milieu donné. Cet indice peut être déterminé par le ratio de la sommation des aires de la couronne des arbres ou de la surface de l'ombre des feuilles des arbres projetée au sol vue d'en haut par rapport à la superficie totale de la région à laquelle l'on s'y intéresse. L'indice de canopée des arbres urbains (ICAU) du Québec peut ainsi être déterminé par la sommation des aires des couronnes d'arbres par rapport à la superficie des milieux urbains québécois.

#### **5.4.1 Détermination de l'indice de canopée des arbres en milieu urbain au Québec**

Il est possible d'estimer l'indice de canopée des arbres en milieu urbain au Québec en se référant à des données issues de l'étude de Pasher et al. (2014) relativement à l'évaluation du stock de carbone et de la séquestration de carbone par les forêts urbaines du Canada. Cependant, puisque l'intérêt de l'essai se concentre sur la province de Québec, seules les données correspondantes au contexte québécois ont été utilisées afin d'évaluer le potentiel de séquestration de carbone au Québec.

Le tableau suivant présente les calculs permettant d'estimer l'indice de canopée de la couverture des arbres en milieu urbain au Québec.

**Tableau 5.12 Estimation de l'indice de canopée des arbres au Québec dans les principaux centres urbains** (tiré de : Pasher et al., 2014, p. 492)

Régions	Superficie urbaine à l'intérieur du périmètre de réconciliation (km <sup>2</sup> ) (population>30,000)	ICAU %
Bouclier boréal de l'Est	142	40.3
Plaine à forêts mixtes	3240	29.7
Maritime de l'Atlantique	217	39.0
<b>Total</b>	<b>3599</b>	<b>30.7</b>

Les données relativement aux indices de canopée des arbres urbains du secteur de l'est du Bouclier boréal du Québec sont de 40,3 %. Les régions des plaines à forêts mixtes et du maritime de l'Atlantique ont un ICAU de 29,7 % et 39 % respectivement. Ces données, tirées de l'étude de Pasher et al. (2014), permettent d'établir l'indice moyen de canopée des arbres urbains au Québec. Un calcul établissant la moyenne pondérée de l'ICAU en fonction de la superficie correspondante à leur secteur permet de déterminer que l'indice de canopée des arbres urbains ou son équivalent anglophone *l'urban tree canopy (UTC)* est de 30,7 % dans les milieux urbains québécois. Notons au passage que la superficie totale urbaine du Québec ne représente pas 3 599 km<sup>2</sup>. Ce chiffre ne représente qu'environ 67 % de la superficie du territoire urbain du Québec puisque, rappelons-le, l'aire de la surface de réconciliation urbaine du Canada représente 16 300 km<sup>2</sup> sur un total de superficie urbaine canadienne totale de 24 200 km<sup>2</sup>, soit une proportion de 67 % (Pasher et al., 2014). Ainsi, les milieux urbains québécois engloberaient plus de 5 300 km<sup>2</sup> de superficie. Ainsi, les calculs de séquestration de carbone au Québec seront basés, dans un premier temps, sur la superficie urbaine à l'intérieur du périmètre de réconciliation, soit 3 599 km<sup>2</sup>, afin de pouvoir établir avec plus de précision le taux de séquestration de carbone dans les principaux centres urbains. Ensuite, l'on procédera à une estimation de la séquestration de carbone par les forêts urbaines de l'ensemble du territoire urbain au Québec.

#### 5.4.2 Séquestration actuelle de carbone au-dessus de la surface du sol

Mentionnons que les calculs visant à déterminer le taux de séquestration de carbone suivront en général ceux de Pasher et al. (2014). La formule suivante, fournie par le GIEC, permet de déterminer le stock de carbone et le taux de séquestration de carbone par les arbres en fonction de l'aire de la couronne des arbres.

$$\Delta C_G = AT \times CRW \text{ (tiré de Pasher et al., 2014)}$$

où  $\Delta C_G$  correspond à l'accumulation brute annuelle de carbone attribuée à la biomasse en tonnes de carbone par année, AT correspond à l'aire total de la couverture des couronnes des arbres urbains en hectare (ha) et CRW correspond au taux de croissance de la couverture des couronnes d'arbres dans leurs milieux urbains en tonne de carbone par hectare de couverture de couronne par année (ibid.).

Dans un contexte canadien, le taux de croissance de la couverture des couronnes d'arbres (CRW) vaut  $2,12 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (Pasher et al., 2014) alors qu'aux États-Unis celui-ci vaut  $2,77 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (Nowak, Greenfield, Hoehn et Lapoint, 2013). Ainsi, afin d'estimer les données relatives à la séquestration de carbone au Québec, le taux de croissance canadien de la couverture des couronnes d'arbres, c'est-à-dire le  $CRW_{\text{Canada}}$  semble être la valeur la plus appropriée à utiliser. Ainsi aux fins de cette étude la relation suivante est présumée :

$$CRW_{\text{Québec}} = CRW_{\text{Canada}} = 2,12 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$$

Il a été établi que la superficie urbaine des principaux centres de populations du Québec est de  $3\,599 \text{ km}^2$ . Cela correspond à  $359\,900 \text{ ha}$ . La valeur de l'AT est obtenue en utilisant la formule suivante :

$$AT = H \times \text{ICAU}$$

où H correspond à la superficie du territoire urbain, soit dans ce cas-ci  $359\,900 \text{ ha}$  et l'ICAU correspond à l'indice de canopée des arbres urbains au Québec, soit  $30,7 \%$ .

L'application de cette formule permet de déterminer que la somme des aires couvertes par les couronnes des arbres urbains au Québec représente une superficie d'un peu plus de  $110\,400 \text{ ha}$ . Ainsi, en multipliant cet AT par son CRW, l'on obtient le  $\Delta C_G$ . Ainsi, le taux de séquestration brute de carbone des arbres en milieu urbain au Québec représente un peu plus de  $234\,000 \text{ t C / an}$  ou plus de  $858\,000 \text{ t CO}_2 / \text{an}$ . Nowak et al. (2013) suggère que le taux de séquestration de carbone net correspond à  $74 \%$  du taux brut. Ainsi, le taux de séquestration de carbone net, c'est-à-dire le taux de séquestration brute moins ce qui réémit par notamment la tombée des feuilles, des arbres en milieu urbain représente plus de  $173\,000 \text{ t C / an}$  ou plus de  $635\,000 \text{ t CO}_2 / \text{an}$ . Rappelons que la conversion du C en  $\text{CO}_2$  se fait avec un ratio de  $44/12$ .

Pour la détermination du stock de carbone, la formule  $\Delta C_G = AT \times CRW$  est réutilisée, mais en changeant la valeur du CRW par  $76,9 \text{ t C / ha}$  (Pasher et al., 2014). En changeant ainsi la valeur du CRW, l'on passe d'un taux de séquestration de carbone au stock de carbone contenu dans les arbres. Ainsi, le stock de



carbone urbain québécois au-dessus de la surface du sol représente près de 8,5 millions de tonnes de carbone ou plus de 31 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Le tableau ci-dessous résume ces résultats.

**Tableau 5.13 Séquestration de carbone au-dessus de la surface sol par les arbres urbains des principaux centres de population du Québec** (adapté de : Pasher et al., 2014)

Régions urbaines du Québec	Aire urbaine (pop. > 30 000) (km <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	ICAU (%) <sup>1</sup>	Surface des couronnes (ha)	Stock de carbone (t C)	Séquestration de carbone brute (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration de carbone nette (t C / an <sup>-1</sup> )	Séquestration de CO <sub>2</sub> nette (t CO <sub>2</sub> an <sup>-1</sup> )
	A	B	C = A×B	D = C×76,9	E = C×2,12	F = 0,74×E	G = F×E
Bouclier boréal de l'est	142	40.3	6 000	440 000	12 000	9 000	33 000
Plaine à forêts mixtes	3240	29.7	96 000	7 400 000	204 000	151 000	554 000
Maritime de l'Atlantique	217	39.0	8 000	651 000	18 000	13 000	49 000
<b>Total</b>	<b>3599</b>	<b>30.7</b>	<b>110 000</b>	<b>8 491 000</b>	<b>234 077</b>	<b>173 000</b>	<b>635 000</b>

1. Tiré de Pasher et al. (2014)

Au Québec, plus de 500 000 tonnes de CO<sub>2</sub> sont séquestrées par les arbres urbains situés dans les principaux centres de populations de la région des plaines à forêts mixtes. Cela représente plus de 85 % de la séquestration de CO<sub>2</sub> nette par les arbres en contexte urbain.

Le tableau suivant permet de rendre compte de la séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol par les arbres urbains sur l'ensemble du territoire urbain du Québec

**Tableau 5.14 Séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol par les arbres urbains de l'ensemble du territoire urbain du Québec** (inspiré de : Pasher et al., 2014)

Régions urbaines du Québec	Aire urbaine totale estimée (km <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	ICAU (%) <sup>2</sup>	Surface des couronnes (ha)	Stock de carbone (t C)	Séquestration de carbone brute (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration de carbone nette (t C / an <sup>-1</sup> )	Séquestration de CO <sub>2</sub> nette (t CO <sub>2</sub> an <sup>-1</sup> )
	A	B	C = A×B	D = 76,9×C	E = 2,12×C	F = 0,74×E	G = F×44/12
Bouclier boréal de l'est	211	40.3	8 000	653 000	18 000	13 000	49 000
Plaine à forêts mixtes	4806	29.7	143 000	10 977 000	303 000	224 000	821 000
Maritime de l'Atlantique	322	39.0	13 000	965 000	27 000	20 000	72 000
<b>Total</b>	<b>5339</b>	<b>30.7</b>	<b>164 000</b>	<b>12 595 000</b>	<b>347 000</b>	<b>257 000</b>	<b>942 000</b>

1. Adapté de Pasher et al. (2014)

2. Tiré de Pasher et al. (2014)

Ce tableau consiste en une représentation estimée de la séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol par les arbres urbains de l'ensemble du territoire urbain du Québec. En fait, les résultats de ce tableau ont été obtenus en effectuant les mêmes calculs que le tableau précédent, mais en ajustant les données relatives à l'aire urbaine. Dans le tableau précédent, les données de l'aire urbaine correspondent à la superficie urbaine des principaux centres de populations, c'est-à-dire les centres urbains ayant une population supérieure à 30 000 habitants. Dans ce tableau, la superficie totale urbaine du Québec a été estimée en tenant pour acquis que la superficie urbaine des principaux centres de population représente 67 % de la superficie totale urbaine du Québec, comme il en est le cas pour le Canada (Pasher et al., 2014). L'indice de canopée des arbres urbains de l'ensemble du territoire du Québec est en réalité supérieur à l'ICAU des principaux centres de populations (Pasher et al., 2014). Cependant, étant donné que l'ICAU des centres urbains ayant une population inférieure à 30 000 habitants est inconnu, le même indice de canopée, soit l'ICAU des principaux centres de populations, est réutilisé de telle manière à toujours effectuer des calculs conservateurs lorsque les données ne sont pas disponibles. Puisque les données utilisées sont relativement récentes, il est possible d'affirmer, à la lumière des résultats de ce tableau, que la biomasse aérienne des arbres du Québec en milieu urbain conserve actuellement un stock de carbone de plus de 12,5 millions de tonnes de carbone. De plus, les arbres du Québec en milieu urbain ont un taux de

séquestration nette de carbone au-dessus de la surface du sol de plus de 250 000 tonnes de carbone par an ou de près d'un million de tonnes de CO<sub>2</sub> annuellement. Cela représente environ 1,5 % des émissions annuelles de dioxyde de carbone au Québec.

#### **5.4.3 Séquestration actuelle de carbone par les arbres urbains sous la surface du sol**

La majorité des articles scientifiques publiés jusqu'à ce jour en matière de séquestration de carbone en milieu urbain portent sur la séquestration de carbone se produisant au-dessus de la surface du sol dans les arbres (Dorendorf, Eschenbach, Schmidt et Jensen, 2015). Il semble y avoir un manque d'information dans la littérature à l'égard des interactions qui se produisent concernant la séquestration de carbone sous la surface du sol (Grover, Maheswari, Desai, Gopinath et Venkateswarlu, 2015). Une certaine lacune est également notée par Dorendorf et al. (2015) en ce qui a trait à la non-prise en compte de la séquestration de carbone par la biomasse souterraine notamment dans les calculs de l'absorption de carbone dans les inventaires de nationaux GES. Néanmoins, la littérature scientifique permet tout de même une compréhension sommaire de la séquestration de carbone sous le niveau du sol.

En effet, la séquestration souterraine de carbone est effectuée dans le sol notamment par l'évolution des racines des arbres et par l'action microbienne des microorganismes qui décomposent les substances organiques racinaires en mode aérobie ou anaérobie (Bourque, 2010). La décomposition des substances en présence d'oxygène, c'est-à-dire en mode aérobie produit du dioxyde de carbone. La décomposition anaérobie, elle, se produit sans présence d'oxygène et libère du méthane (CH<sub>4</sub>). Durant ces processus, une partie du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> générés retourne dans l'atmosphère, le reste demeurant dans le substrat du sol (ibid.). Vergriete et Labrecque (2007) évaluent qu'il est possible d'augmenter la valeur du taux de séquestration de carbone de 50 à 75 % si l'on tient compte également compte de la séquestration sous la surface du sol ou la séquestration souterraine de carbone. Ainsi, l'évaluation du taux de séquestration de carbone représente mieux la réalité si l'on évalue également la séquestration de carbone sous la surface du sol. Parallèlement, le GIEC (s. d.) rapporte que plus de la moitié du carbone capturé est transporté sous terre par le système racinaire et par l'incorporation de feuilles et de bois morts dans le sol. Le carbone est amené dans le sol par le système racinaire de par la croissance des racines, la décomposition et le renouvellement de celles-ci. Qui plus est, les feuilles tombant à l'automne, par exemple, ainsi que le bois mort forment une litière riche en carbone, laquelle s'incorpore au fil du temps dans le sol augmentant ainsi le stock de carbone dans le sol (GIEC, s. d.). À titre d'information, les sols, dotés d'une réserve de carbone se situant entre 1500 et 2000 Gt de carbone à l'échelle planétaire (Robert et Saugier, 2004), constituent la plus grande réserve de stock de carbone de tout l'écosystème terrestre (Aubert, 2010). La quantité de carbone contenue dans la biomasse aérienne, c'est-à-dire la végétation, représente environ le tiers du stock

de carbone contenu dans le sol (FAO, 2002). Une étude de Dorendorf et al. (2015) effectuée dans la ville d'Hamburg en Allemagne a permis de déterminer que le stock souterrain de carbone de la couche supérieure du sol, c'est-à-dire jusqu'à une profondeur de 30 cm, représente environ le double du stock de carbone contenu dans les arbres au-dessus de la surface du sol dans cette ville urbaine. À titre informatif, il y a à Hamburg deux millions de tonnes de carbone dans la structure aérienne des arbres et environ quatre millions de tonnes de carbone dans la couche supérieure du sol minéral (Dorendorf, 2015).

#### **5.4.4 Séquestration actuelle de carbone au-dessus et en dessous de la surface du sol**

Aux fins de cet essai, puisque l'on vise à établir le taux de séquestration de carbone par les arbres urbains, il est opportun de prendre en considération à la fois la séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol et en dessous de la surface du sol. Rappelons-le, les calculs de séquestration de carbone par les arbres urbains au Québec précédemment effectués consistent en une estimation de la séquestration de carbone au-dessus du niveau du sol seulement. Afin d'être plus conforme à la réalité, sans vouloir surévaluer la séquestration de carbone, une bonification de 50 % est appliquée au taux de séquestration de carbone par les arbres urbain pour tenir compte de la séquestration souterraine du carbone en se basant sur le fait que le taux de séquestration souterraine de carbone représente au moins la moitié de ce qui se fait dans la partie aérienne (Vergriete et Labrecque, 2007). Ainsi, le tableau suivant présente les résultats finaux en matière de séquestration de carbone par les arbres dans un contexte urbain sur l'ensemble de la superficie urbaine du Québec.

**Tableau 5.15 Séquestration de carbone de l'ensemble du territoire urbain du Québec par les arbres urbains au-dessus et en dessous de la surface du sol (inspiré de : Pasher et al., 2014)**

Régions urbaines du Québec	Aire urbaine totale estimée (km <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	ICAU (%) <sup>2</sup>	Séquestration aérienne de carbone brute (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration souterraine de carbone brute (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration de carbone brute totale (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration de carbone nette totale (t C / an <sup>-1</sup> )	Séquestration de CO <sub>2</sub> nette totale (t CO <sub>2</sub> an <sup>-1</sup> )
	A	B	C = 2,12×A×B	D = C/2	E = C + D	F = 0,74×E	G = F×44/12
Bouclier boréal de l'est	211	40.3	18 000	9 000	27 000	20 000	73 000
Plaine à forêts mixtes	4806	29.7	303 000	151 000	454 000	336 000	1 232 000
Maritime de l'Atlantique	322	39.0	27 000	13 000	40 000	30 000	108 000
<b>Total</b>	<b>5339</b>	<b>30.7</b>	<b>347 000</b>	<b>174 000</b>	<b>521 000</b>	<b>385 000</b>	<b>1 413 000</b>

1. Adapté de Pasher et al. (2014)

2. Tiré de Pasher et al. (2014)

Ce tableau consiste en une représentation estimée de la séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol et également en dessous de la surface du sol par les arbres urbains sur l'ensemble du territoire urbain du Québec. En fait, les résultats de ce tableau ont été obtenus en effectuant les mêmes calculs que le tableau précédent, mais en bonifiant de 50 % les valeurs relatives à la séquestration de carbone. Encore une fois, la superficie totale urbaine du Québec a été estimée en tenant pour acquis que la superficie urbaine des principaux centres de population représente 67 % de la superficie totale urbaine du Québec. Cela représente une superficie d'environ 5 300 km<sup>2</sup>. L'indice de canopée des arbres urbains de l'ensemble du territoire du Québec utilisé est une fois de plus le même indice de canopée que celui des principaux centres de populations, et ce, afin de s'assurer que les calculs ne surestiment pas la séquestration réelle de carbone au Québec par les arbres en milieu urbain. Finalement, il est possible d'affirmer, à la lumière des résultats de ce tableau, que la biomasse aérienne et souterraine des arbres du Québec en milieu urbain ont un taux de séquestration nette de carbone au-dessus de la surface du sol de près de 400 000 tonnes de carbone par an ou de près de 1,5 million de tonnes de CO<sub>2</sub> annuellement. Cela représente environ 2,2 % des émissions totales annuelles de dioxyde de carbone au Québec.

#### 5.4.5 Estimations du potentiel de séquestration de carbone par les arbres au-dessus de la surface du sol en milieu urbain au Québec

Maintenant, que la situation actuelle en matière de séquestration de carbone par les arbres en milieu urbain est connue sur le territoire du Québec, il convient de procéder à une estimation de ce potentiel de séquestration. Le potentiel de séquestration de carbone fait par les arbres en milieu urbain peut être déterminé en augmentant l'ICAU. Le tableau suivant présente une estimation du potentiel de séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol par les arbres urbains sur l'ensemble du territoire urbain du Québec en fonction d'un ICAU allant de 0 % à 100 %.

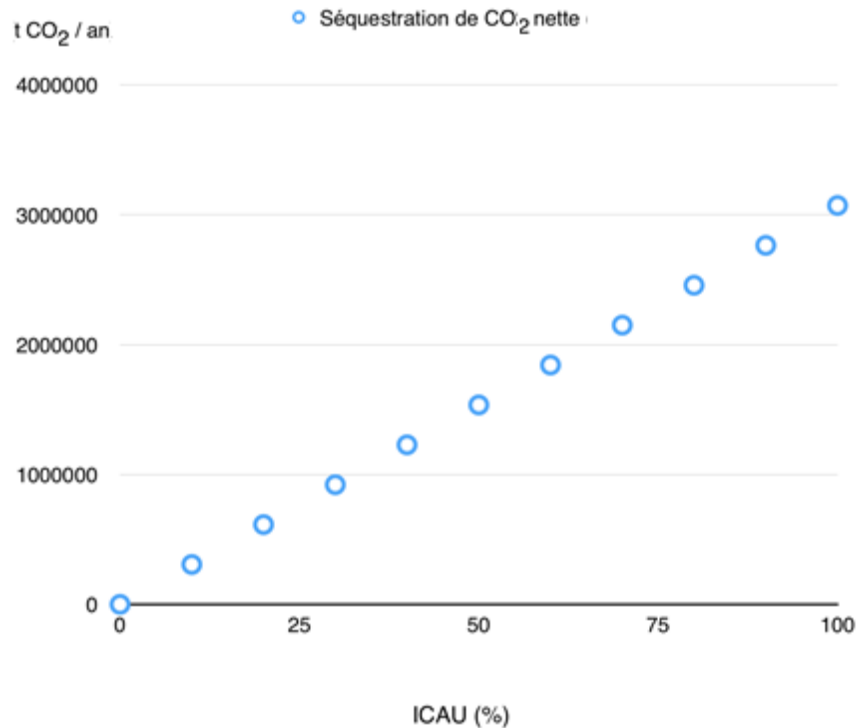
**Tableau 5.16 Potentiel de séquestration de carbone au-dessus de la surface du sol par les arbres urbains de l'ensemble du territoire urbain du Québec selon l'indice de canopée urbaine**

ICAU (%)	Surface des couronnes (ha)	Stock de carbone (t C)	Séquestration de carbone brute (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration de carbone nette (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration de CO <sub>2</sub> nette (t CO <sub>2</sub> an <sup>-1</sup> )
A	B = A×533 900	C = 76,9×B	D = 2,12×B	E = 0,74×D	F = E×44/12
0	0	0	0	0	0
10	53 390	4 105 000	113 000	84 000	307 000
20	106 800	8 211 000	226 000	168 000	614 000
30	160 200	12 316 000	340 000	251 000	921 000
40	213 600	16 422 000	453 000	335 000	1 228 000
50	267 000	20 527 000	566 000	419 000	1 535 000
60	320 300	24 633 000	679 000	503 000	1 843 000
70	373 700	28 738 000	792 000	586 000	2 150 000
80	427 100	32 844 000	905 000	670 000	2 457 000
90	480 500	36 949 000	1 019 000	754 000	2 764 000
100	533 900	41 055 000	1 132 000	838 000	3 071 000

Le potentiel de séquestration nette de CO<sub>2</sub> au-dessus de la surface du sol varie entre zéro et trois millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an selon un indice de canopée des arbres en milieu urbain allant de zéro à 100 %. Au Québec, l'ICAU est évalué à environ 30 %, ce qui représente près d'un million de tonnes CO<sub>2</sub> séquestré annuellement par les arbres en milieu urbain. Tirant inspiration notamment de la Convention sur la

diversité biologique et des recherches scientifiques jusqu'à ce jour, le Service canadien de la faune d'Environnement et Changement climatique Canada, a établi des lignes directrices relativement à la biodiversité dans un document s'intitulant « Quand l'habitat est-il suffisant? ». Dans ce document, l'on suggère un taux de couverture forestier entre 30 et 50 % pour réduire les risques de ne pas pouvoir soutenir la richesse potentielle des espèces et des systèmes aquatiques (ECCC, 2013). En fait, un taux de couverture de 30 % représente une approche risquée pour la survie des espèces et des systèmes aquatiques, alors qu'un taux de couverture de 40 % et 50 % représentent une approche moyennement risquée et faiblement risquée respectivement (ibid.). En supposant que les efforts en matière d'augmentation de la séquestration de carbone s'enlignent avec la volonté de mieux protéger la biodiversité, le tableau ci-dessus permet de prédire que la séquestration de carbone en milieu urbain par les arbres augmentera peu à peu, probablement d'ici quelques décennies, pour se rapprocher de 1,5 million de tonne de dioxyde de carbone séquestré annuellement si l'on parvient à avoir un couvert de canopée représentant la moitié de la superficie urbaine québécoise, comme le suggère la ligne directrice du couvert forestier du Service de la faune d'ECCC (ECCC, 2013). En fait, dans une optique visant à protéger la biodiversité, un indice de canopée supérieur à 50 % serait souhaitable de façon à ce que les risques de pertes en matière de biodiversité soient faibles. Rappelons que la ville d'Atlanta possède un indice de canopée de 48 % actuellement, ce qui est très proche de cet objectif. Dans des scénarios plus optimistes, par exemple, pour un indice de canopée réaliste de 70 %, il serait possible que le taux de séquestration de CO<sub>2</sub> atteigne plus de deux millions de CO<sub>2</sub> annuellement jusqu'à un maximum inimaginable de trois millions de tonnes de CO<sub>2</sub> séquestrés annuellement par la biomasse aérienne des arbres en milieu urbain dans le cas d'un scénario complètement impossible où le couvert de canopée représente la totalité de la superficie urbaine du Québec.

La figure ci-dessous présente également la séquestration de CO<sub>2</sub> nette au-dessus du sol par les arbres en milieu urbain en fonction de l'indice de canopée



**Figure 5.7 Potentiel de séquestration de CO<sub>2</sub> nette au-dessus du sol par les arbres urbains en fonction de l'indice de canopée au Québec**

Cette figure illustre comment la séquestration de carbone varie en fonction du taux de couverture arboré en milieu urbain. En fait, il apparaît que le dioxyde de carbone est séquestré de façon proportionnelle à l'indice de canopée des arbres. Cette courbe, parfaitement linéaire et montrant cette relation entre l'ICAU et la séquestration de carbone, montre l'avantage d'augmenter l'indice de canopée des arbres puisque plus il y a d'arbres, plus il y aura d'absorption de carbone.

#### **5.4.6 Estimation du potentiel de séquestration de carbone en milieu urbain par les arbres au-dessus et en dessous de la surface du sol au Québec**

En réalité, la séquestration de carbone se fait aussi en dessous de la surface du sol. Ainsi, il convient d'estimer le potentiel de séquestration total de carbone, soit la séquestration au-dessus de la surface du sol et en dessous de la surface du sol. Le tableau suivant présente le potentiel de séquestration de carbone au-



dessus et en dessous de la surface du sol par les arbres urbains de l'ensemble du territoire urbain du Québec selon l'indice de canopée urbaine.

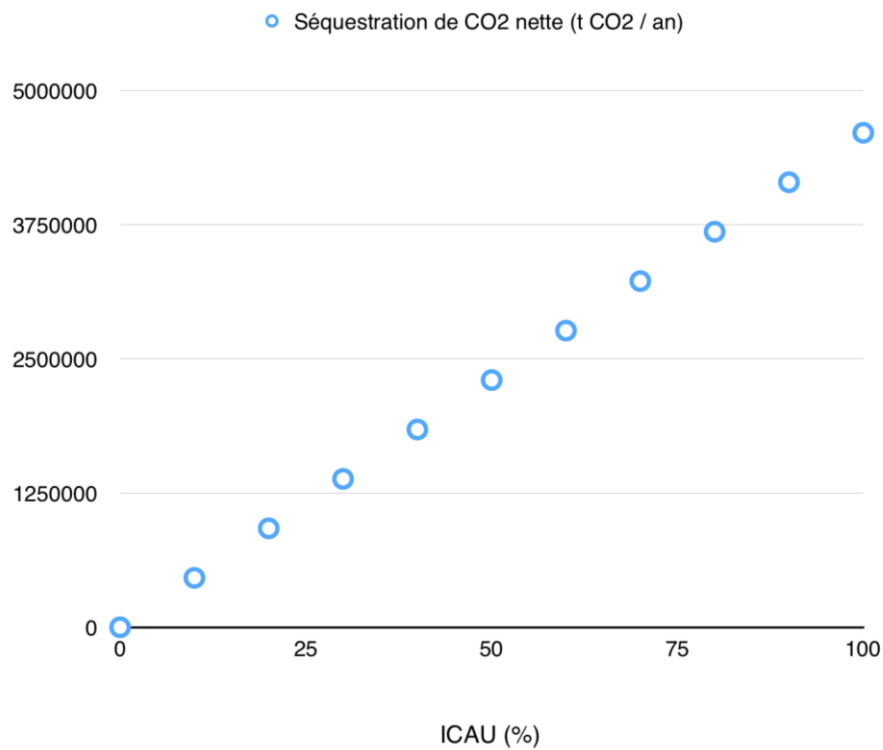
**Tableau 5.17 Potentiel de séquestration de carbone au-dessus et en dessous de la surface du sol par les arbres urbains de l'ensemble du territoire urbain du Québec selon l'indice de canopée urbaine**

ICAU (%)	Surface des couronnes (ha)	Stock de carbone (t C)	Séquestration de carbone brute (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration de carbone nette (t C an <sup>-1</sup> )	Séquestration de CO <sub>2</sub> nette (t CO <sub>2</sub> an <sup>-1</sup> )
A	B = A×533 900	C = 76,9×B	D = 2,12×B×1,5	E = 0,74×D	F = E×44/12
0	0	0	0	0	0
10	53 390	4 105 000	169 771	125 631	460 646
20	106 800	8 211 000	339 542	251 261	921 291
30	160 200	12 316 000	509 313	376 892	1 381 937
40	213 600	16 422 000	679 085	502 523	1 842 583
50	267 000	20 527 000	848 856	628 153	2 303 229
60	320 300	24 633 000	1 018 627	753 784	2 763 874
70	373 700	28 738 000	1 188 398	879 415	3 224 520
80	427 100	32 844 000	1 358 169	1 005 045	3 685 166
90	480 500	36 949 000	1 527 940	1 130 676	4 145 811
100	533 900	41 055 000	1 697 711	1 256 306	4 606 457

Le potentiel de séquestration nette de CO<sub>2</sub> au-dessus de la surface du sol et en dessous de la surface du sol varie entre zéro et plus de 4,6 millions de CO<sub>2</sub> par an selon un indice de canopée des arbres en milieu urbain allant de zéro à 100 %. Au Québec, l'ICAU est évalué à environ 30 %, ce qui représente près de 1,5 million de tonnes CO<sub>2</sub> séquestrées annuellement au total par les arbres en milieu urbain au-dessus de la surface du sol et en dessous de la surface du sol. Tirant notamment inspiration de la Convention sur la diversité biologique et des recherches scientifiques jusqu'à ce jour, le Service canadien de la faune d'Environnement et Changement climatique Canada, a établi des lignes directrices relativement à la biodiversité dans un document s'intitulant « Quand l'habitat est-il suffisant? » (ECCC, 2013). Dans ce document, l'on suggère un taux de couverture forestier entre 30 et 50 % pour réduire les risques de ne pas pouvoir soutenir la richesse potentielle des espèces et des systèmes aquatiques (ibid.). En fait, un taux de couverture de 30 % représente une approche risquée pour la survie des espèces et des systèmes aquatiques, alors qu'un taux de couverture de 40 % et 50 % représentent une approche moyennement risquée et

faiblement risquée respectivement (ibid.). En supposant que les efforts en matière d'augmentation de la séquestration de carbone s'enlignent avec la volonté de mieux protéger la biodiversité, le tableau ci-dessus permet de prédire que la séquestration de carbone en milieu urbain par les arbres au-dessus et en dessous de la surface du sol augmentera peu à peu, probablement d'ici quelques décennies, pour se rapprocher de 2,3 millions de tonnes de dioxyde de carbone séquestré annuellement si l'on parvient à avoir un couvert de canopée représentant la moitié de la superficie urbaine québécoise, comme le suggère la ligne directrice du couvert forestier du Service de la faune d'ECCC (ECCC, 2013). Cela permettrait de compenser environ 4 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone du Québec.

Dans des scénarios plus optimistes, par exemple pour un indice de canopée de 70 %, il serait possible que le taux de séquestration de CO<sub>2</sub> atteigne plus de 3,2 millions de CO<sub>2</sub> annuellement jusqu'à un maximum inimaginable théorique de 4,6 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> séquestrés annuellement par la biomasse aérienne et souterraine des arbres en milieu urbain dans le cas d'un scénario complètement impossible où le couvert de canopée représente la totalité de la superficie urbaine du Québec. Cela correspond à une absorption représentant entre 5 et 7 % des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> québécois respectivement. La figure suivante illustre par ailleurs le potentiel de séquestration de CO<sub>2</sub> nette au-dessus et en dessous de la surface du sol par les arbres en milieu urbain en fonction de l'indice de canopée.



**Figure 5.8 Potentiel de séquestration de CO<sub>2</sub> nette en dessous et au-dessus du sol par les arbres urbains en fonction de l'indice de canopée au Québec**

Cette figure est en fait une actualisation de la figure précédente en intégrant la séquestration souterraine de carbone par les arbres. Cette figure permet de visualiser la relation linéaire entre la couverture arborée et le potentiel de séquestration de CO<sub>2</sub> au-dessus et en dessous de la surface du sol par les arbres en milieu urbain au Québec.

### 5.5 Synthèse du potentiel de séquestration de carbone par le verdissement urbain

Les sections précédentes ont permis d'estimer le potentiel de séquestration de carbone par les principales techniques de verdissement urbaines, soit les toits verts, les murs végétaux, de même que par les arbres en milieu urbain. Cette section combine le potentiel de séquestration de carbone par ces techniques de verdissement urbain. Le tableau suivant présente le potentiel combiné de séquestration de CO<sub>2</sub> par le verdissement urbain en fonction du taux d'atteinte de du potentiel maximal de séquestration de CO<sub>2</sub> par les différentes techniques de verdissement :

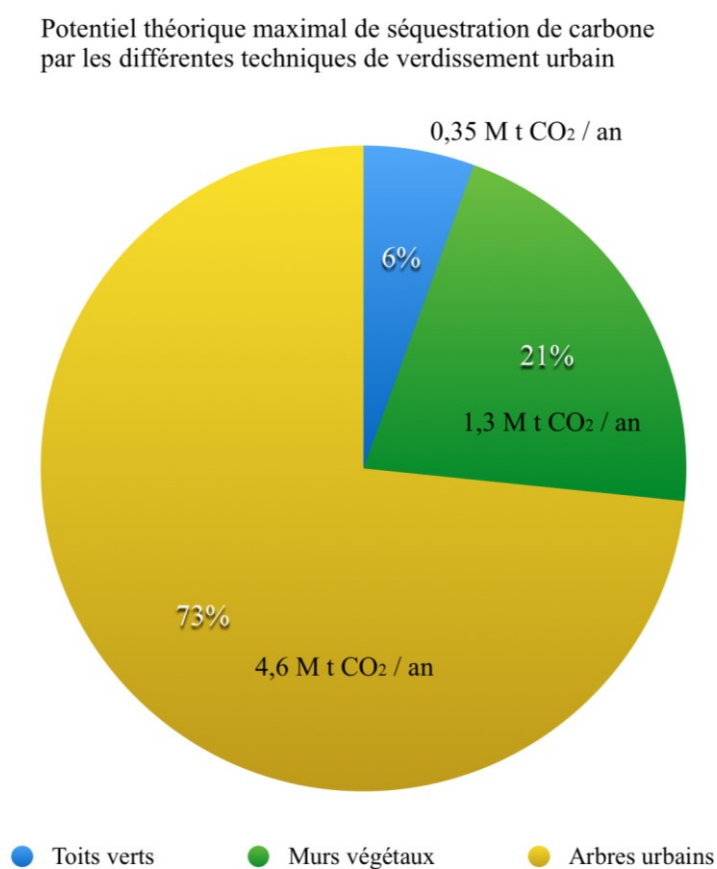
**Tableau 5.18 Potentiel combiné de séquestration de CO<sub>2</sub> par le verdissement urbain**

Taux d'atteinte du potentiel maximal de séquestration de CO <sub>2</sub>					
Verdissement urbain	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Toits verts	0	87 309	174 618	261 926	349 235
Murs végétaux	0	330 431	660 863	991 294	1 321 725
Arbres urbains	0	1 151 614	2 303 229	3 454 843	4 606 457
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>1 569 354</b>	<b>3 138 709</b>	<b>4 708 063</b>	<b>6 277 417</b>
Pourcentage des émissions de CO <sub>2</sub> québécois					
	0 %	2 %	5 %	7 %	10 %

Selon les résultats du tableau ci-dessus, la combinaison toits verts, murs végétaux et arbres urbains offre un potentiel de séquestration de CO<sub>2</sub> de près de 6,3 millions de tonnes de carbone par année si la totalité des toits, des murs et de l'espace urbain en termes d'indice de canopée était végétalisée. Cela représente un potentiel théorique maximal de séquestration de carbone par le verdissement urbain pouvant compenser jusqu'à 10 % des émissions de CO<sub>2</sub> québécois par année. Notons qu'il n'est toutefois pas nécessaire de détruire tous les bâtiments pour atteindre un ICAU de 100 %. En effet, il serait possible de concevoir des aménagements urbains astucieux permettant d'avoir un couvert arboré qui se mélange aux bâtiments. Dans

un esprit plus réaliste, si le taux d'atteinte de verdissement urbain était atteint à 50 % pour les toits verts, les murs végétaux ainsi que pour l'indice de canopée des arbres en milieu urbain, alors la végétation urbaine permettrait de séquestrer plus de 3,1 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par année. Cela représente un potentiel de séquestration de carbone par le verdissement urbain pouvant compenser 5 % des émissions de dioxyde de carbone québécois annuellement.

Le graphique suivant présente la part du potentiel de séquestration de carbone pouvant être effectuée par les toits verts, les murs végétaux ainsi que par les arbres urbains :



**Figure 5.9 Potentiel théorique maximal de séquestration de carbone par les différentes techniques de verdissement urbain**

La figure 5.9 ci-dessus permet de noter que le potentiel de séquestration de carbone se fait majoritairement par les arbres en milieu urbain, soit à 73 %. L'utilisation des murs végétaux comme approche pour séquestrer le carbone n'est toutefois qu'au stade embryonnaire au Québec, mais son potentiel représente 21 % du potentiel de séquestration de carbone parmi les techniques de verdissement urbain. Il est ainsi

intéressant de constater que bien que les murs végétaux séquestrent pour le moment, moins de carbone que les toits verts, son potentiel de séquestration de carbone est supérieur à celui pouvant être effectué par les toits verts. La part du potentiel de séquestration de carbone par les toits verts représente 6 % du potentiel de séquestration de carbone par le verdissement urbain.

## **6. EFFET D'ENTRAÎNEMENT**

Ce chapitre a pour but d'analyser si la séquestration naturelle de carbone par l'intégration du verdissement en milieu urbain peut jouer un rôle dans la création d'un effet d'entraînement sociétal menant à un changement favorisant l'amélioration de la qualité de l'environnement. D'abord, l'on se questionnera sur pourquoi un tel changement est souhaitable. Ensuite, l'on abordera la théorie du changement de Raubenheimer, lequel s'intéresse tout particulièrement à un changement d'un système plus sobre en émission de carbone. Finalement, un lien sera effectué entre la séquestration naturelle de carbone par le verdissement urbain et l'effet d'entraînement que cela peut induire. Notons également que ce chapitre bénéficie de citations tirées d'une entrevue que l'auteur de l'essai a réalisée avec un expert dans le domaine de la psychologie, M. Christopher Naud, D.Ps. M. Naud s'intéresse également à une meilleure harmonisation entre la Terre et l'humain et est actuellement actif dans la production de vidéos cinématographiques à ce sujet. La psychologie du changement est une facette intéressante qui mérite que l'on s'y attarde pendant un moment dans une perspective de lutte contre les changements climatiques.

### **6.1 Pourquoi un changement?**

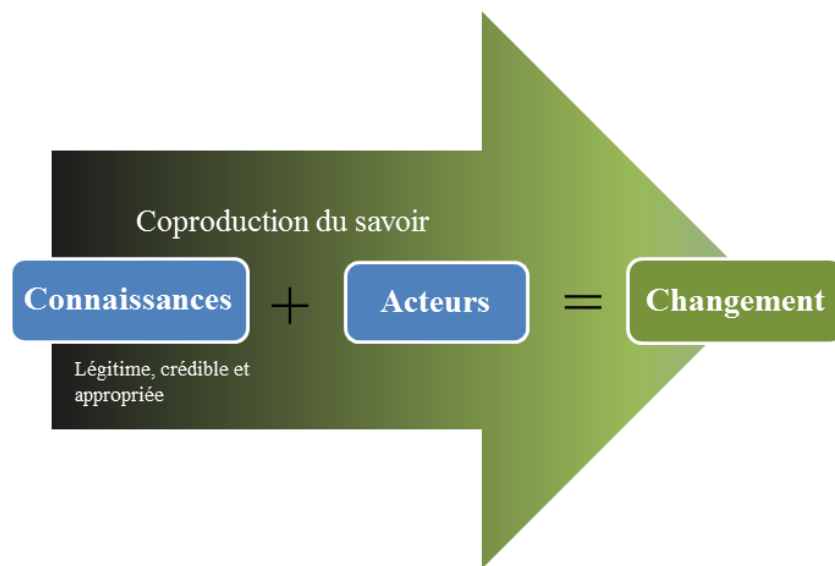
Alors que la stabilité climatique de l'ère holocène s'altère depuis le début de la révolution industrielle en 1750, les scientifiques doivent admettre pour la première fois de l'histoire de l'humanité que nous sommes entrés dans une nouvelle ère géologique d'origine humaine — celle de l'anthropocène (Frescoz et Bonneuil, 2016). Cette ère se caractérise par une empreinte humaine sur l'environnement devenue si grande qu'elle « rivalise avec certaines des grandes forces de la nature en termes d'impact sur le système Terre » (ibid.). Les activités de l'Homme, en modifiant notamment le cycle du carbone, le cycle de l'eau de même que le cycle de l'azote et de la lithosphère (Frescoz et Bonneuil, 2016), bousculent l'équilibre écosystémique essentiel à la vie sur Terre.

### **6.2 La théorie du changement de Raubenheimer**

Le changement est un processus qui peut représenter une certaine inquiétude puisque le changement implique une certaine méconnaissance de ce qui adviendrait du futur. Stef Raubenheimer, professeur à l'Université du *Cape Town* en Afrique du Sud, suggère une approche de changement qui permet d'atténuer ce sentiment inconfortable lié au changement. M. Raubeiheimer s'intéresse particulièrement sur comment pourrait se produire un changement vers un système ayant une empreinte carbone significativement plus faible dans le futur (Raubenheimer, 2015).

Selon Raubenheimer (2015), les êtres humains, en particulier ceux des pays développés, vivent dans un système dépendant : un système qui repose essentiellement sur des activités axées sur un haut degré d'émissions de carbone. Le processus de changement est complexe et nécessite l'intervention de plusieurs acteurs de la société, comme le gouvernement, le secteur privé, les gens de la société civile, des chercheurs, des étudiants, des experts ainsi que « vous », soit le lecteur et « moi », l'auteur de cet essai (Raubenheimer, 2015).

Un système peut changer sous l'action d'une force extérieure ou en fonction d'un comportement interne au système (Raubenheimer, 2015). En ce qui concerne l'avenir de la planète, le changement du comportement interne joue un rôle clef dans le changement d'une société vers un système qui tient compte des limites des écosystèmes de la biosphère. L'image ci-dessous résume la théorie du changement de Raubenheimer (2015) :



**Figure 6.1 Théorie du changement** (adapté de : Raubenheimer, 2015)

De manière simplifiée, selon la théorie de changement de Raubenheimer, il faut combiner les différents acteurs de la société pour coproduire une connaissance, un savoir sur lequel ces mêmes acteurs se baseront pour justifier le besoin de changer. Changer vers quelque chose de mieux. Changer parce que « *it's the right thing to do* », parce que c'est la bonne chose à faire. À partir du moment où les acteurs de la société auront codocumenté la littérature, c'est-à-dire créer une connaissance en concertation avec les acteurs, ceux-ci seront plus enclins à participer activement au changement vers ce nouveau système plus respectueux envers l'environnement (Raubenheimer, 2015). Ceci démontre que la manière dont la

connaissance est produite est aussi importante que l'utilisation de cette connaissance pour changer le système (ibid.). Qui plus est, la connaissance produite doit être « *legitimate, credible and salient* » (Raubenheimer, 2015).

D'abord, la coproduction de l'information ou du savoir doit être légitime. Généralement cette légitimité selon ce que véhiculent les expériences de Raubenheimer (2015) est conférée par les instances gouvernementales, et cela permet d'amorcer le processus de la production de la connaissance. Cette première étape est importante puisque cela permet de susciter un engagement des parties prenantes à s'impliquer dans le processus de la production de la connaissance nécessaire au changement désiré (Raubenheimer, 2015).

Ensuite, l'information produite doit être crédible. Une information devient crédible lorsqu'il y a une évidence, notamment par la documentation scientifique, que le changement auquel on aspire consiste à la bonne voie à suivre (Raubenheimer, 2015).

Finalement, la connaissance produite doit être appropriée au contexte et la participation des acteurs est un élément crucial à la réussite du changement. Les acteurs de la société doivent se sentir concernés pour la réussite du changement auquel on veut tendre. Grâce à ces aspects, la probabilité que les gens suivent l'élan du changement est augmentée (Raubenheimer, 2015).

Dans une perspective d'application de cette théorie du changement, il est intéressant de remarquer que la production de la connaissance peut expliquer en partie l'essor des toits verts en Allemagne et à Toronto. Dans le cas des toits verts, par exemple, la connaissance des végétaux appropriés au milieu ainsi que le développement de la technologie s'avèrent être des conditions permettant d'assurer le succès de l'implantation. À ces égards, il est intéressant de remarquer, comme il a été discuté dans le chapitre 4, qu'autant en Allemagne qu'à Toronto, la production d'un savoir particulier, soit la production de guides de bonnes pratiques relatifs à la mise en place de toitures végétalisées coïncide dans les deux cas, au début du processus menant éventuellement à l'essor de l'installation de toits verts en Allemagne et à Toronto.

### **6.3 La séquestration naturelle de carbone en milieu urbain : un vecteur de changement?**

Le chapitre 5 a permis d'établir que le verdissement urbain possède un potentiel significatif de séquestration de carbone permettant de séquestrer en partie les émissions de CO<sub>2</sub> québécois dans la lutte contre les changements climatiques. Il est aussi permis de se demander si la séquestration naturelle de



carbone par le verdissement en milieu urbain peut contribuer à jouer un rôle sociétal pouvant induire un effet d'entraînement favorisant l'adoption d'un mode de vie plus sain et sécuritaire envers la nature.

Les résultats de recherches scientifiques en lien avec cette question tendent à démontrer, depuis la dernière décennie (David Suzuki, 2013), que les espaces verts sont source de santé physique et psychique pour les êtres humains (Réseau École et Nature, 2013). Le contact avec un environnement naturel peut notamment contribuer à réduire la pression artérielle, le stress, l'anxiété et peut aussi favoriser la bonne humeur et même renforcer le système immunitaire (David Suzuki, 2013). De plus, soulignons que

« La présence d'espaces verts au sein d'un environnement urbain améliore l'espérance de vie et diminue les risques de maladies. Les espaces verts favorisent la marche et autre activité de plein air et constituent un moyen bon marché et durable d'assurer la prévention des problèmes de santé publique. » (Réseau École et Nature, 2013).

D'autres sources font même état de l'existence d'une synergie « entre le bien-être du vivant et le bien-être planétaire, et vice-versa » (Nature Humaine, 2014). Cela est en lien avec un des champs d'application de la psychologie nommé « l'écopsychologie ». Selon cette approche ayant débuté dans les années 90, il existerait une interdépendance vitale entre le bien-être humain et celui de la planète (ibid.). Autrement dit, si la planète se porte mal au niveau environnemental, le bien-être humain sera également affecté. Toutefois, si l'environnement de la planète se porte bien, alors l'être humain se sentira mieux.

Qui plus est, Richard Louv, dans son livre intitulé « *Last Child in the Woods* » fait le constat d'un « syndrome de manque de nature » (Réseau École et Nature, 2013). Le développement technologique surtout d'ordre numérique, bien qu'il offre de multiples avantages, a comme effet pervers de retenir les gens trop souvent à l'intérieur. Aujourd'hui, plus de 80 % du temps est passé à l'intérieur des espaces clos (Pelosse, 2011). L'éloignement de la nature est d'autant plus accentué en milieu urbain. D'autres parts, l'auteur de ce livre vendu à plus d'un million d'exemplaires (Réseau École et Nature, 2013) fait remarquer que le manque d'exposition à la nature peut nuire au développement sain des enfants. Qui plus est, le contact avec la nature offre une sensation de détente, augmente la créativité des enfants, diminue le stress et contribue à une meilleure santé physique, psychique et émotionnelle selon le même auteur.

Selon le Réseau École et Nature (2013), qui regroupe plus de 1000 personnes morales et 800 personnes physiques en France, la relation avec l'environnement se développe lorsque l'humain entre en contact avec la nature. Si ce contact se fait tôt dans la vie d'une personne, alors celle-ci peut bénéficier d'un éveil à la vie qui deviendra une source de motivation pour prendre soin de ce qui l'entoure.

En fait, la présence de végétaux dans le tissu urbain entretient un sentiment d'attachement avec la nature. De plus, selon M. Christopher Naud, D.Ps (doctorat en psychologie), qui a accepté de faire une entrevue *ad hoc* portant sur ce chapitre, s'il « devient à la mode de manger végétarien et de s'occuper des plantes végétales et que les médias l'encouragent [...] les gens seront plus enclins à adopter ces comportements » (C. Naud, entrevue, 27 septembre 2016). Par conséquent, il est permis de présumer que cela favorise l'adoption d'un mode de vie tenant davantage compte du respect de l'environnement. Cette conscientisation environnementale consiste en un aspect important dans une optique où l'on cherche à influencer ou convaincre les gens sur l'aspect selon lequel le passage du *statu quo* vers un système à faible empreinte carbonique « *is the right thing to do* » est la bonne voie à suivre. Le milieu urbain au Québec concentre plus de 80 % de la population québécoise. Ainsi, le contact avec la nature en milieu urbain apparaît dans ce contexte comme étant un élément favorisant la naissance d'une impulsion qui peut déclencher un changement de comportement sociétal pour tendre vers ce que l'on veut, soit un système qui respecte les limites des écosystèmes. Mais, d'abord, comme le mentionne si bien M. Naud : « le combat contre la maltraitance de notre terre mère (et par extension le changement climatique) est d'abord intérieur [...] le véritable changement commence d'abord en soi et par soi » (C. Naud, entrevue, 27 septembre 2016). M. Naud évoque également une problématique reliée au système dans lequel nous vivons — un système axé sur le capitalisme « fondé sur l'apparence et la superficialité » (ibid.) et influencé par un faible niveau de tolérance face à la comparaison. Ainsi, « l'égo » se retrouve constamment « préoccupé à assurer la pérennité de ses besoins désincarnés de son environnement naturel [...] égaré de sa véritable nature intérieure » (C. Naud, entrevue, 27 septembre 2016). Ce « désincarnement » peut, sans doute, s'expliquer en partie par un manque de contact avec la nature. En ce sens, si l'on parvient à créer un système qui intègre davantage la végétation dans la vie quotidienne des citoyens, alors le système possédera une plateforme qui tend à motiver les gens à prendre soin de l'environnement et de renouer avec « sa véritable nature intérieure ».

Ainsi, le changement peut être favorisé, selon ce qui vient d'être discuté, d'une part par les principes que véhicule la théorie du changement de Raubenheimer et, d'autres parts, par la création d'un environnement vert propice qui a une influence sur le plan psychologique de la conscientisation environnementale des gens. Si la combinaison de ces facteurs est réunie, la probabilité d'être témoin d'un changement est augmentée.

En somme, il est peut-être encore tôt pour se prononcer, mais semble-t-il que la séquestration de carbone en milieu urbain par le verdissement possède un potentiel « caché » permettant de contribuer davantage à la lutte contre les changements climatiques; d'une part par la séquestration de carbone et, d'autre part, en

favorisant la conscientisation environnementale — élément essentiel pour promouvoir l'effet d'entraînement de changement.

## **7. RECOMMANDATIONS**

Les recommandations de ce chapitre visent à promouvoir, étape par étape, la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain dans une perspective de lutte contre les changements climatiques. Les recommandations établies prennent la forme d'une série de stratégies, de moyens et de livrables. Les recommandations se résument en trois stratégies à appliquer et chacune d'elles est supportée par deux moyens permettant d'y parvenir. Qui plus est, pour chaque moyen, un livrable est également suggéré. Le tableau suivant présente le résumé de ces recommandations :

**Tableau 7.1 Résumé des recommandations visant à promouvoir la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain comme outil de lutte contre les changements climatiques**

Stratégies	Moyens	Livrables
<b>S 1 : Créer le savoir québécois en matière de séquestration naturelle de carbone en milieu urbain</b>	M 1.1 : Coopérer notamment avec les scientifiques, les horticulteurs, les ingénieurs, les citoyens et les municipalités pour codocumenter les bonnes pratiques de verdissements et ses avantages	L 1.1.1 : Production d'un guide adapté au contexte québécois sur les bonnes pratiques et les avantages du verdissement en milieu urbain
	M 1.2 : Valider les règles de bonnes pratiques de verdissement urbain par des expérimentations réelles	L 1.2.1 : Effectuer des projets pilotes ou exemplaires en vue de démontrer l'efficacité des bonnes pratiques proposées par le guide
<b>S 2 : Informer/sensibiliser</b>	M 2.1 : Diffuser les informations relatives à la séquestration de carbone par le verdissement en milieu urbain dans les médias	L 2.1.1 : Briefing de presse avec les journalistes et les médias
	M 2.2 : Tenir des réunions de concertation avec les différentes parties prenantes en vue de sensibiliser autant les acteurs de la société civile que les décideurs politiques	L 2.2.1 : Les différentes parties prenantes sont convaincues de la nécessité d'agir en matière de séquestration naturelle de carbone en milieu urbain
<b>S 3. : Agir/verdir</b>	M 3.1 : Fournir des incitatifs favorisant une augmentation de la séquestration de carbone par des techniques de verdissement en milieu urbain	M 3.1.1 : Les municipalités ou autres organismes compétents fournissent des incitatifs et adoptent des réglementations visant à augmenter la verdure en ville
	M 3.2 : Appliquer les bonnes pratiques de verdissement urbain pour végétaliser les murs, les toits et les espaces disponibles	M. 3.2.1 : Essor démontré de l'implantation de toits verts, de murs végétaux ainsi qu'à une augmentation de l'indice de canopée des arbres en milieu urbain au Québec

### **7.1 Stratégie 1 : Créer le savoir québécois en matière de séquestration naturelle de carbone en milieu urbain**

Il a été établi au chapitre 6 que la production du savoir est un élément clé pouvant aider à engendrer un effet d'entraînement de changement vers un système à faible empreinte écologique. Dans cette optique, si

l'on veut que tous les acteurs de la société s'impliquent dans la transition d'une société plus verte en passant par les gens de la société civile aux dirigeants politiques, il est opportun de mettre sur pied un niveau de connaissance approprié à cet effet. Ainsi, la première étape à réaliser est de créer un savoir, d'acquérir des connaissances spécifiques au contexte québécois en matière de séquestration naturelle de carbone en milieu urbain.

#### **7.1.1 Moyen 1.1 : Coopérer notamment avec les scientifiques, les horticulteurs, les ingénieurs, les citoyens et les municipalités pour codocumenter les bonnes pratiques de verdissements et ses avantages**

Le premier moyen en lien avec la première stratégie est de coopérer notamment avec les scientifiques, les horticulteurs, les ingénieurs, les citoyens et les municipalités pour codocumenter les bonnes pratiques de verdissements et ses avantages. Les connaissances créées en concertation avec les différents joueurs à cet égard peuvent porter sur les techniques de plantation d'arbres, les technologies à utiliser ou à développer pour la végétalisation des toits et des murs sans oublier les règles de bonnes pratiques relativement aux entretiens nécessaires au maintien d'une bonne santé des végétaux.

Le livrable attendu en lien avec le moyen 1.1 est la production d'un guide adapté au contexte québécois sur les bonnes pratiques et les avantages du verdissement en milieu urbain. Soulignons que la coopération des différentes parties prenantes à la réalisation de ce guide est essentielle, comme le veut l'esprit de la théorie du changement de Raubenheimer, afin de favoriser éventuellement l'applicabilité de ce guide par les acteurs mêmes de ceux qui ont participé à la production du rapport.

#### **7.1.2 Moyen 1.2 : Valider les règles de bonnes pratiques de verdissement urbain par des expérimentations réelles**

Le deuxième moyen en lien avec la première stratégie consiste à valider les règles de bonnes pratiques de verdissement urbain par des expérimentations réelles. En effet, une fois les connaissances acquises notamment à travers la production d'un guide portant sur les meilleures pratiques permettant d'assurer un meilleur taux de succès sur le verdissement en milieu urbain, il est de mise de valider ce savoir par des expériences réelles. « Il faut aller de l'avant, continuer les recherches et oser prendre le risque de l'expérimentation » (Bernier, 2011).

Le livrable attendu en lien avec le moyen 1.2 est la réalisation de projets pilotes ou exemplaires en vue de démontrer l'efficacité des bonnes pratiques de verdissement urbain proposées par le guide. Parfois, dans l'esprit des gens, et pour diverses raisons, la théorie ne rime pas nécessairement avec la pratique. Dans cette optique, il est important de démontrer qu'au Québec, il est aussi possible de procéder au verdissement urbain. Les projets pilotes par exemple de toits verts, de murs végétaux ou d'arbres urbains permettent de valider les connaissances acquises par une démonstration de son applicabilité sur le terrain. Les gens seront ainsi plus convaincus et plus confiants lorsqu'ils entameront leurs projets de verdissement urbain.

## **7.2 Stratégie 2 : Informer/sensibiliser**

La deuxième stratégie consiste à informer et à sensibiliser l'ensemble des acteurs de la société en matière de la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain. En effet, une fois les connaissances développées au sein de la communauté en matière de verdissement urbain, le moment devient plus propice pour diffuser l'information au public.

### **7.2.1 Moyen 2.1 : Diffuser les informations relatives à la séquestration de carbone par le verdissement en milieu urbain dans les médias**

Le premier moyen en lien avec la deuxième stratégie consiste à diffuser les informations relatives à la séquestration de carbone par le verdissement en milieu urbain dans les médias. Cela permet dans un premier temps de vulgariser au public les informations relatives aux bonnes pratiques de verdissement urbain et de les sensibiliser sur le double rôle que joue la séquestration naturelle de carbone dans la lutte contre les changements climatiques. D'une part, la végétation séquestre le dioxyde de carbone atténuant l'effet du réchauffement climatique et, d'autre part, la présence de la végétation améliore le cadre de vie des citoyens favorisant du coup un plus grand respect envers la nature. Ces éléments ont été traités dans les chapitres cinq et six respectivement en qui a trait à la séquestration de carbone et à l'amélioration du bien-être humain en relation avec la nature.

Le livrable attendu en lien avec le moyen 2.1 consiste à effectuer des briefings de presse avec les journalistes et les médias. Les médias seront les relais des informations et permettront de fournir une plus grande visibilité concernant la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain — un sujet qui mérite certainement d'être plus souvent entendu et discuté. En outre, un site web ou un centre de ressource virtuel pourrait être créé en vue de faciliter la recherche de renseignements par le public relativement à la séquestration de carbone en milieu urbain.

### **7.2.2 Moyen 2.2 : Tenir des réunions de concertation avec les différentes parties prenantes en vue de sensibiliser autant les acteurs de la société civile que les décideurs politiques**

Une diffusion des informations à travers les médias est bien, mais il est encore plus convaincant d'entretenir des conversations de vive voix pour sensibiliser davantage. Ainsi, le deuxième moyen en lien avec la deuxième stratégie consiste à tenir des réunions de concertation avec les différentes parties prenantes en vue de sensibiliser autant les acteurs de la société civile que les décideurs politiques. Le but de cette action est de convaincre le plus d'acteurs possibles, comme les municipalités, le gouvernement et les gens de la société civile, que le moment est venu d'agir et de contribuer, tout un chacun, selon ce que chacun peut faire, à mettre un terme au réchauffement planétaire par l'adoption de mesures visant à favoriser la séquestration de carbone en milieu urbain par notamment les toits verts, les murs végétaux et l'augmentation de l'indice de canopée des arbres en milieu urbain.

Le livrable attendu en lien avec le deuxième moyen de la stratégie consiste à ce que les différentes parties prenantes sont convaincues de la nécessité d'agir en matière de séquestration naturelle de carbone en milieu urbain. Cela a pour but de créer un environnement propice pour donner un élan sociétal en matière de changement. En fait, après avoir créé le savoir et après avoir sensibilisé suffisamment, l'on espère créer une synergie suffisamment grande entre les parties prenantes pour provoquer le « momentum » — le moment à partir duquel les membres de la communauté s'influenceront les uns sur les autres, créant un effet d'entraînement, pour prendre plus soin de notre planète notamment en adoptant des pratiques de verdissement urbain dans la vie quotidienne des citoyens.

Il est à remarquer que cet essai porte principalement de la séquestration naturelle de carbone et du verdissement urbain, mais il se pourrait fort bien que sous l'influence de cette impulsion les gens adoptent également des pratiques ou des habitudes de vie ayant un impact environnemental faible. Tel est le but ultime.

### **7.3 Stratégie 3 : Agir/verdir**

La troisième stratégie consiste à agir, à verdir les murs, les toits et les espaces urbains en augmentant le couvert arboré. En effet, la documentation suggère, et cela a été traité au chapitre 6, que la présence de la végétation augmente le bien-être ainsi que la santé physique et psychique des êtres humains. Ne serait-ce qu'un arbre à la fois ou une simple feuille qui pousse à la lumière du jour, la végétation en milieu urbain joue un rôle important dans la lutte contre les changements climatiques et tous les acteurs de la société ont un rôle à jouer dans le verdissement urbain.



### **7.3.1 Moyen 3.1 : Fournir des incitatifs favorisant une augmentation de la séquestration de carbone par des techniques de verdissement en milieu urbain**

Le premier moyen en lien avec la troisième stratégie consiste à fournir des incitatifs favorisant une augmentation de la séquestration de carbone par des techniques de verdissement en milieu urbain. Dans un premier temps, ce moyen concerne particulièrement les municipalités ou tout autre organisme ayant compétence, comme le MAMOT ou le gouvernement, pouvant offrir un soutien financier permettant de réduire les coûts initiaux des travaux de verdissement urbain.

Notons que le fait de fournir des incitatifs financiers peut être un investissement rentable aussi pour les municipalités. En effet, comme il en a été traité dans le chapitre 3, le verdissement en milieu urbain présente de nombreux bénéfices économiques, sociaux et environnementaux.

Rappelons, par exemple, que la végétalisation des toits verts permet de réduire les coûts associés aux traitements des eaux et de gestion des surverses municipales. Il est ainsi intéressant tant pour les individus que pour la collectivité de bénéficier des incitatifs financiers visant à promouvoir le verdissement en milieu urbain.

Le livrable attendu en lien avec le premier moyen de la troisième stratégie consiste donc à ce que les municipalités ou autres organismes compétents fournissent des incitatifs financiers et adoptent des réglementations visant à augmenter la verdure en ville. Il pourrait y avoir à titre d'exemple la mise sur pied de programmes financiers permettant de financer en partie les efforts de verdissement urbains que ce soit par l'installation de toits verts, de murs végétaux ou par la plantation d'arbres en milieu urbain. Qui plus est, l'élaboration de règlements ou de normes écologiques dans le secteur de la construction peut être une option intéressante à explorer, voire un élément obligatoire à envisager dans une société du XXI<sup>e</sup> siècle. Par exemple, il pourrait y avoir une réglementation municipale obligeant les promoteurs à restaurer les espaces verts perdus pour toutes nouvelles constructions. Il est aussi suggéré de réviser le code de Construction du Québec de façon à promouvoir davantage la végétalisation des bâtiments dans les normes de construction de la société de demain. Rappelons que la végétalisation du bâti présente de nombreux avantages financiers qui découlent d'une meilleure isolation thermique des bâtiments par les végétaux. Pour plus d'informations à ce sujet, se référer au chapitre 3.

### **7.3.2 Moyen 3.2 : Appliquer les bonnes pratiques de verdissement urbain pour végétaliser les murs, les toits et les espaces disponibles**

Le deuxième moyen en lien avec la troisième stratégie consiste à appliquer les bonnes pratiques de verdissement urbain pour végétaliser les murs, les toits et les espaces disponibles. À partir du moment que les mesures réglementaires et les incitatifs financiers sont mis en place pour la promotion de la verdure en ville notamment par les toits verts, les murs végétaux et la plantation d'arbres en milieu urbain, alors l'on s'attend à un essor en matière de travaux sur le verdissement en milieu urbain par la communauté et aussi par le secteur public.

Le livrable attendu en lien avec le deuxième moyen de la troisième stratégie consiste à être témoin d'un essor démontré de l'implantation de toits verts, de murs végétaux ainsi qu'à une augmentation de l'indice de canopée des arbres en milieu urbain au Québec. En parallèle, il importe que la réalisation des travaux de verdissement urbain se fasse selon les règles de l'art, soit en appliquant les bonnes pratiques de verdissement urbain. L'application des bonnes pratiques de verdissement urbain permet d'assurer le succès des travaux et par conséquent, d'éviter notamment des pertes financières fâcheuses si les travaux de verdissement ne se déroulent pas comme prévu, par exemple, si la végétation ne parvient pas à résister au climat québécois ou s'il y a un problème d'étanchéité des toits, etc.

## CONCLUSION

Les changements climatiques représentent un défi de taille pour la société du XXI<sup>e</sup> siècle. Il devient de plus haute importance de prendre en considération toutes les opportunités possibles afin d'additionner la contribution de chaque action à la lutte contre les changements climatiques — ne serait-ce qu'une feuille à la fois. Dans le cadre de cet essai, une attention particulière a été portée sur la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain dans une optique de lutte contre le réchauffement planétaire. En effet, le milieu urbain s'avère être un lieu de rencontres, d'échanges et de partages pouvant faciliter un changement de comportements sociétaux tenant davantage compte du respect de la nature et cet essai encourage particulièrement le verdissement urbain par les toits verts, les murs végétaux ainsi que par les arbres en milieu urbain.

L'objectif principal de cet essai était d'évaluer le rôle que joue la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain comme outil de lutte contre les changements climatiques dans une perspective de développement durable en vue de favoriser une meilleure intégration de la nature dans le mode de vie des citoyens. Cet objectif a été atteint dans la mesure où les trois sous-objectifs qui le sous-tendent ont aussi été atteints.

D'abord, le premier sous-objectif consistait à exposer un portrait de ce qui se fait en matière de séquestration et d'en faire une analyse économique sommaire en vue de déterminer la faisabilité des différentes mesures de verdissement urbain permettant de favoriser la séquestration de carbone. Les principales techniques de verdissement urbain analysées sont les toits verts, les murs végétaux et les arbres en milieu urbain. À cet effet, une revue de la littérature a permis notamment d'établir les principales conditions favorisant la séquestration de carbone par les végétaux en milieu urbain. De plus, une analyse économique a permis de mettre en relief le fait que chacune de ces techniques de verdissement analysées entraîne des bénéfices financiers rendant ainsi les différentes techniques de verdissement urbain plus accessibles. Notons également que la végétation en milieu urbain offre de nombreux bénéfices environnementaux et sociaux.

Ensuite, le deuxième sous-objectif consistait à estimer sommairement et de manière approximative, selon les données disponibles et les limites de temps pour la réalisation de l'essai, le potentiel de captage de CO<sub>2</sub> par la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain au Québec, et ce, particulièrement par des approches de verdissement urbain. Ainsi, les calculs effectués au chapitre 5 ont permis d'établir le potentiel de séquestration de carbone pouvant être réalisé par la végétation sur les toits verts, les murs végétaux et les arbres en milieu urbain. La combinaison de ces trois techniques de verdissement urbain

présente un potentiel considérable de séquestration de carbone en milieu urbain. Or, les résultats des calculs démontrent que la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain québécois possède un potentiel significatif d'absorption de carbone pouvant séquestrer, en partie, les émissions de dioxyde de carbone émis au Québec. Le potentiel maximal de séquestration par les végétaux est pour le moment encore loin d'être atteint en milieu urbain au Québec. Autrement dit, il reste encore beaucoup de travail de verdissement à réaliser devant nous.

Qui plus est, si des mesures incitatives financières ou réglementaires adéquates étaient mises en place par des instances relevant notamment de l'échelle municipale, cela encouragerait les efforts en lien avec le verdissement urbain. Il y aurait ainsi plus de toits verts installés, plus de murs végétaux construits et plus d'arbres plantés en milieu urbain. Par conséquent, cela permettrait d'augmenter le taux de séquestration de carbone et ainsi contribuer davantage à l'atténuation du réchauffement climatique.

Le troisième sous-objectif consistait à mettre en perspective l'effet d'entraînement des approches de séquestration de carbone notamment celui du verdissement urbain sur le changement d'une culture ou d'un mode de vie d'une société plus en harmonie avec l'environnement. La littérature déborde d'exemples illustrant le besoin des êtres humains d'être en contact avec la nature. En outre, le verdissement en milieu urbain peut entraîner des bénéfices sur la santé physique et psychologique des êtres humains. Ainsi, il est permis d'affirmer, à la lumière d'une revue de la littérature et aussi par l'appui des informations tirées d'une entrevue, que la séquestration naturelle de carbone par le verdissement urbain s'inscrit dans une démarche favorisant la transition vers une société vivant dans le respect de l'environnement.

En somme, deux constats principaux ont été observés à la suite de la réalisation de cet essai quant au rôle joué par la séquestration naturelle de carbone dans la lutte contre changements climatiques. Dans un premier temps, il appert que la séquestration naturelle de carbone en milieu urbain possède un potentiel significatif d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> québécois. Dans un deuxième temps, il appert que cette séquestration de carbone, se faisant essentiellement par des techniques de verdissement urbain, joue également un rôle d'éveil à la conscientisation environnementale. Cet aspect moins flagrant, à première vue, constitue pourtant un aspect important pour favoriser un effet d'entraînement sociétal dans la transition du *statu quo* vers un système ayant un faible impact environnemental soutenable par la planète. Une planète qui « s'étouffe » actuellement dans les fumées produites par les activités anthropiques excessives...

## RÉFÉRENCES

- Alden, C.-B., Ballantyne, A., Miller, J.-B., Tans, P.-P., White, J W-C. (2012). *Increase in observed net carbon dioxide uptake by land oceans during the past 50 years*. Repéré sur le site de ResearchGate, section Publications: [https://www.researchgate.net/publication/230615762\\_Increase\\_in\\_observed\\_net\\_carbon\\_dioxide\\_uptake\\_by\\_land\\_oceans\\_during\\_the\\_past\\_50\\_years](https://www.researchgate.net/publication/230615762_Increase_in_observed_net_carbon_dioxide_uptake_by_land_oceans_during_the_past_50_years)
- Arboquebecium (2016). *Arbres du Québec*. Repéré sur le site d'Arboquebecium, section Arbres au Québec : <http://www.arboquebecium.com/fr/arbres-du-quebec/>
- Arbres Canada (2009). *Arbres Canada : votre partenaire en foresterie urbaine*. Repéré sur le site de la Société internationale d'arboriculture Québec, section Conférence : [http://www.siaq.org/\\_conference/arbres\\_canada\\_partenaire.pdf](http://www.siaq.org/_conference/arbres_canada_partenaire.pdf)
- Arbres Canada (2016). *Calculatrice de carbone*. Repéré sur le site de Arbres Canada, section Programmes : <https://treecanada.ca/fr/programmes/plantez-de-lair-pur/calculatrice-du-carbone/>
- Aubert, C. (2010). *Stocker du carbone dans le sol, un enjeu majeur*. Repéré sur le site de EcoREV, section Les dossiers : <http://ecorev.org/spip.php?article920>
- Au jardins (2016). *Hortensia grim pant*. Repéré sur le site de Au jardins, section Plantes : [http://www.aujardin.info/plantes/hortensia\\_grimpant.php](http://www.aujardin.info/plantes/hortensia_grimpant.php)
- Baeyer, E. V. (2015). *Parcs urbains*. Repéré sur le site de l'Encyclopédie canadienne, section Géographie : [http://www.encyclopediecanadienne.ca/fr/article/parcs-urbains/#h3\\_jump\\_0](http://www.encyclopediecanadienne.ca/fr/article/parcs-urbains/#h3_jump_0)
- Banque Mondiale (2014). *Les risques climatiques augmentent alors qu'un réchauffement de 1,5 °C apparaît déjà inéluctable, selon un nouveau rapport*. Repéré sur le site de la Banque Mondiale, section Actualités : <http://www.banquemondiale.org/fr/news/feature/2014/11/23/climate-report-finds-temperature-rise-locked-in-risks-rising>
- Banque Mondiale (2016). *Population urbaine (% du total)*. Repéré sur le site de la Banque Mondiale, Section Données : <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=CA>
- Beaudoin, G. (s. d.). *La séquestration du carbone: une troisième voie pour le Protocole de Kyoto*. Repéré sur le site de l'université Laval, section Séquestration du carbone : <https://www.ggl.ulaval.ca/enregistrements/professeur/gbeaudoin/georges-beaudoin-sequestration-du-carbone/#c2290>
- Béliveau, O., Trottier, A. (2009). *Toiture végétale en milieu institutionnel: Étude de cas UQAM*. Repéré sur le site de l'Association des gestionnaires des parcs immobiliers institutionnels (AGPI) section Colloques : [https://www.agpi.org/documents/file/colloques/2009/T7\\_COLLOQUE\\_AGPI\\_2009-2\\_O\\_Beliveau\\_A\\_Trottier.pdf](https://www.agpi.org/documents/file/colloques/2009/T7_COLLOQUE_AGPI_2009-2_O_Beliveau_A_Trottier.pdf)
- Bernier, A.-M. (2011a). *Végétalisation du bâtiment en milieu urbain : bénéfiques et perspectives*. (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. Repéré à <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/thesescanada/vol2/QMUQ/TC-QMUQ-4022.pdf>

- Bernier, A.-M. (2011b). *Les plantes grimpantes, une solution rafraichissante*. Repéré sur le site du CEUM, section Documents : [http://www.ecologieurbaine.net/documents/les\\_plantes\\_grimpantes\\_une\\_solution\\_rafraichissante\\_0.pdf](http://www.ecologieurbaine.net/documents/les_plantes_grimpantes_une_solution_rafraichissante_0.pdf)
- Blanc, P. (1988). *Brevet d'invention*. Repéré sur le site de Patrick Blanc, section Médias : [http://media.murvegetalpatrickblanc.com/dl/3317?\\_ga=1.80275159.172974994.1467680819](http://media.murvegetalpatrickblanc.com/dl/3317?_ga=1.80275159.172974994.1467680819)
- Blanc, P. (s. d.). *Le Mur Végétal : Une approche scientifique et artistique*. Repéré sur le site de Patrick Blanc, section Documents : <http://www.murvegetalpatrickblanc.com/documents>
- Blanc, P. (s. d.b). *Paris Île-de-France*. Repéré sur le site de Patrick Blanc, section Europe : <http://www.murvegetalpatrickblanc.com/realisations/europe/paris-ile-de-france>
- Bonhomme, M. (2012). *Création d'un outil d'aide à la décision pour un aménagement durable des espaces verts des municipalités*. (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Montréal, Québec. Repéré à [http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7060/cufe\\_Bonhomme\\_M\\_\\_17-05-2012\\_essai241.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7060/cufe_Bonhomme_M__17-05-2012_essai241.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Botarela (2012). Le mécanisme de la photosynthèse. Repéré sur le site de Botarela, section Les stratégies de photosynthèse : <http://botarela.fr/Poaceae/Famille/Photosynthese-2.html#top>
- Boucher, I. (2006). *Les toits verts*. Repéré sur le site du ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMOT), section Observatoire municipale : [http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire\\_municipal/veille/toits\\_verts.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/veille/toits_verts.pdf)
- Bourassa, Y. (2013). *Comparaison coûts-bénéfices de la forestation urbaine comme stratégie d'atténuation des îlots de chaleur*. (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à [https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais\\_2013/Belanger-Michaud\\_H\\_\\_2013-02-20\\_.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2013/Belanger-Michaud_H__2013-02-20_.pdf)
- Bourque, P. (2010). *Le cycle du carbone*. Repéré sur le site de l'université Laval, section Les grands cycles biogéochimiques et les changements climatiques : <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.carbone.html>
- Brown, R. (2011). *Atlanta Finds Its Identity as Tree Haven Is Threatened*. Repéré sur le site de The New York Times, section U. S. : [http://www.nytimes.com/2011/07/22/us/22trees.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2011/07/22/us/22trees.html?_r=0)
- Bureau du forestier en chef (2016). *Calcul des possibilités forestières*. Repéré sur le site du Bureau du forestier en chef, section Documents : <http://forestierenchef.gouv.qc.ca/documents/calcul-des-possibilites-forestieres/>
- Canada Green Building Council (2014). *Canada Green Building Trends: Bene ts Driving the New and Retro Market*. Repéré sur le site de Canada Green Building Council, section Ressources : <https://www.cagbc.org/cagbcdocs/resources/CaGBC%20McGraw%20Hill%20Cdn%20Market%20Study.pdf>

- Castonguay, M.-J. (2013). *Les toits urbains : un gisement vert à exploiter*. (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à [https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais\\_2013/Castonguay\\_MJ\\_2014-01-15\\_\\_01.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2013/Castonguay_MJ_2014-01-15__01.pdf)
- CECOBOIS (2014). *L'avantage environnemental des systèmes de construction en bois dans le contexte des changements climatiques*. Repéré sur le site de l'Association forestière du sud du Québec, section Construction en bois : [http://www.foretmeridionale.ca/wp-content/uploads/2014/02/avantages\\_eco\\_du\\_bois.pdf](http://www.foretmeridionale.ca/wp-content/uploads/2014/02/avantages_eco_du_bois.pdf)
- Centre national de la recherche scientifique (2006). *Le cycle du carbone*. Repéré sur le site du CNRS, section Géodynamique externe : [http://www.cnrs.fr/cnrsimages/sciencesdelaterreaulycee/contenu/dyn\\_ext2-3.htm](http://www.cnrs.fr/cnrsimages/sciencesdelaterreaulycee/contenu/dyn_ext2-3.htm)
- CEUM (2013). *Aménager des îlots de fraîcheur et améliorer les espaces de vie*. Repéré sur le site de l'Association des architectes paysagiste du Québec (AAPQ) , section Aménagements urbains : [https://aapq.org/sites/aapq.org/files/bibliotheque/ceum\\_brochureverdissement\\_20140122.pdf](https://aapq.org/sites/aapq.org/files/bibliotheque/ceum_brochureverdissement_20140122.pdf)
- Chesnais (2014). *Les Parisiens veulent plus de murs et de façades végétalisés*. Repéré sur le site du Figaro, section Jardins : <http://www.lefigaro.fr/jardin/2014/10/03/30008-20141003ARTFIG00394-les-parisiens-veulent-plus-de-murs-et-de-facades-vegetalises.php>
- City of Toronto (2016). *Green Roofs Bylaw*. Repéré sur le site de City of Toronto, section Green Roofs : <http://www1.toronto.ca/wps/portal/contentonly?vnextoid=83520621f3161410VgnVCM10000071d60f89RCRD&vnextchannel=3a7a036318061410VgnVCM10000071d60f89RCRD>
- City of Toronto (2016b). *Grants for green and cool roofs*. Repéré sur le site de City of Toronto, section Eco-Roof Incentive Program : <http://www1.toronto.ca/wps/portal/contentonly?vnextoid=3a0b506ec20f7410VgnVCM10000071d60f89RCRD>
- Climate Challenge (2013). *Les hommes et le climat*. Repéré sur le site de Climate Challenge, section Des infos en mots et en images : <http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/le-changement-climatique/les-hommes-et-le-climat.aspx>
- CODIFAB (2012). *Le carbone*. Repéré sur le site de CODIFAB, section Chiffres clefs : [http://www.codifab.fr/sites/default/files/vademecum\\_carbone\\_foret\\_bois\\_2012.pdf](http://www.codifab.fr/sites/default/files/vademecum_carbone_foret_bois_2012.pdf)
- Coordination Eau Ile-de-France (2016). *Comment les arbres rafraîchissent la ville*. Repéré sur le site de Coordination Eau Ile-de-France, section Santé et Environnement : <http://eau-iledefrance.fr/comment-les-arbres-rafraichissent-la-ville/>
- ConsoGlobe (2014). *La séquestration du carbone*. Repéré sur le site de ConsoGlobe, section Capture et stockage du carbone : [http://www.encyclo-ecolo.com/CSC\\_Capture\\_et\\_stockage\\_du\\_carbone](http://www.encyclo-ecolo.com/CSC_Capture_et_stockage_du_carbone)
- David Suzuki (2016) : *Sommet sur les infrastructures naturelles du Grand Montréal*. Repéré sur le site de la fondation David Suzuki, section Médias : <http://www.davidsuzuki.org/fr/medias/communiqués-de-presse/2016/04/sommet-sur-les-infrastructures-naturelles-du-grand-montreal/>

- David Suzuki (2013). *Prenez 30 minutes, sortez prendre l'air!* Repéré sur le site de la fondation David Suzuki, section La science en action : <http://www.davidsuzuki.org/fr/blogues/la-science-en-action/2013/05/prenez-30-minutes-sortez-prendre-lair/>
- David Suzuki Foundation (2014). *Carbon tax or cap-and-trade?* Repéré sur le site de David Suzuki Foundation, section Climate Change. <http://www.davidsuzuki.org/issues/climate-change/science/climate-solutions/carbontax-or-cap-and-trade/>
- Davies, Z. G., Edmondson, J. L., Heinemeyer, A., Leake, J. R., & Gaston, K. J. (2011). Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. *Journal Of Applied Ecology*, 48(5), 1125-1134. doi:10.1111/j.1365-2664.2011.02021.x
- Dorendorf, J., Eschenbach, A., Schmidt, K., & Jensen, K. (2015). Both tree and soil carbon need to be quantified for carbon assessments of cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 447-455. doi:10.1016/j.ufug.2015.04.005
- Dunnett, N. et Kingsbury, N. (2008). *Toits et murs végétaux* (2e édition). Rodez, Angleterre : Éditions du Rouergue.
- ECCC (2013). *Quand l'habitat est-il suffisant?* Repéré sur le site du Service canadien de la faune d'ECCC, section Nature : <https://www.ec.gc.ca/nature/default.asp?lang=Fr&n=E33B007C-1>
- Ecofor (2014). *Évaluation de la gestion durable des forêts : Quels indicateurs pour la biodiversité forestière?* Repéré sur le site de Ecofor, section Documents : [http://docs.gip-ecofor.org/public/bgf/BGF\\_Synthese2-Indicateurs.pdf](http://docs.gip-ecofor.org/public/bgf/BGF_Synthese2-Indicateurs.pdf)
- Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McHugh, N., Gaston, K. J. et Leake, J. R. (2012). *Organic carbon hidden in urban ecosystems*. Repéré sur le site de Nature, section Scientific Reports : <http://www.nature.com/articles/srep00963>
- Énerguidé (2016). *Qu'est qu'une toiture verte?* Repéré sur le site de Énerguidé, section bâtiments passifs ou durables : <http://www.energuide.be/fr/questions-reponses/quest-ce-quune-toiture-verte/670/>
- Escobedo, F., Varela, S., Zhao, M., Wagner, W. J. et Zipperer, W. (2010). Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities. *Environmental Science and Policy*, 13(5), 362-365. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901110000274>
- Fassaden Grün (2016). *Boston Ivy*. Repéré sur le site de Fassaden Grün, section Climbing Plants : [http://www.fassadengruen.de/eng/uw/climbing\\_plants/uw/boston\\_ivy/boston\\_ivy.htm](http://www.fassadengruen.de/eng/uw/climbing_plants/uw/boston_ivy/boston_ivy.htm)
- FAO (2002). La séquestration de carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. Repéré sur le site de la FAO, section Archives de documents : <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/y2779F/y2779f00.pdf>
- FIHOQ (2013). Favoriser l'utilisation des végétaux pour améliorer une efficacité énergétique et réduire les émissions de CO2. Repéré sur le site de la FIHOQ, section Médias : [http://www.fihq.qc.ca/medias/Memoire\\_energie\\_FIHOQ\\_final.pdf](http://www.fihq.qc.ca/medias/Memoire_energie_FIHOQ_final.pdf)



- Ferland, A. (2015). *La conservation de la biodiversité en milieu urbain : comment aménager les villes du monde*. (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à [http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8020/Ferland\\_Andreanne\\_MEnv\\_2015.pdf?sequence=3](http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8020/Ferland_Andreanne_MEnv_2015.pdf?sequence=3)
- Fernet, C., Williams, R. (1983). Les parcs urbains au Québec : témoins d'une longue évolution. *Continuité*, 21, 10-13. Repéré à <https://www.erudit.org/culture/continuite1050475/continuite1050661/18897ac.pdf>
- Fressoz, J.-B. et Bonneuil, C. (2016). *L'évènement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*. Paris, France : Seuil
- Gallant, A. (2000). *La plantation et l'entretien d'un arbre*. Repéré sur le site de l'Association des surintendants de golf du Québec, section Communications : <http://www.asgq.org/documents/pdf/communication/archives/LaPlantationEtlEntretienDesArbres.pdf>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M. et Andresen, J. A. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science and Technology*, 43(19), 7564–7570. <http://dx.doi.org/10.1021/es901539x>
- GIEC (2006). 2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Repéré sur le site du GIEC, section Activity : <https://www.ipcc.ch/pdf/activity/2006gls-brochure.pdf>
- Gobeille (2012). Réflexion sur les toits verts et les murs végétaux. Repéré sur le site de Le Devoir, section Jardinage : <http://www.ledevoir.com/plaisirs/jardinage/351779/reflexion-sur-les-toits-verts-et-les-murs-vegetaux#>
- Gonzalez, A., Ronce, O., Ferriere, R. et Hochberg, ME. (2013) Evolutionary rescue: an emerging focus at the intersection between ecology and evolution. *Philosophical Transaction of the Royal Society B* 368. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2012.0404>
- Gouvernement du Canada (2015). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Repéré sur le site du Gouvernement du Canada sur les Changements climatiques, section Mesures internationales : <http://www.climatechange.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=D6B3FF2B-1>
- Gouvernement du Canada (2016). *Changements climatiques : à vos la parole!* Repéré sur le site du Gouvernement du Canada, section Changements climatiques : <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/action-pour-climat.html>
- Green Over Grey (2009). *Sustainability*. Repéré sur le site de Green Over Grey, section Gree Wall Benefits : <http://www.greenovergrey.com/green-wall-benefits/sustainability.php>
- Green Roofs (2014). *2013 Annual Green Roof Industry Survey*. Repéré sur le site de Green Roofs, section Survey : <http://www.greenroofs.org/resources/GreenRoofIndustrySurveyReport2013.pdf>
- Green Roofs (2015). *2014 Annual Green Roof Industry Survey*. Repéré sur le site de Green Roofs, section Survey : <http://www.greenroofs.org/resources/GreenRoofIndustrySurveyReport2014.pdf>

- Groupe Banque TD (2015). *Perspective pour la construction non résidentielle au Canada*. Repéré sur le site de TD, section Services économiques TD : [https://www.td.com/francais/document/PDF/economics/special/Non\\_Residential\\_Construction\\_Outlook\\_fr.pdf](https://www.td.com/francais/document/PDF/economics/special/Non_Residential_Construction_Outlook_fr.pdf)
- Grover, M., Maheswari, M., Desai, S., Gopinath, K. et Venkateswarlu, B. (2015). Review: Elevated CO<sub>2</sub>: Plant associated microorganisms and carbon sequestration. *Applied Soil Ecology*, 95, 73-85. doi:10.1016/j.apsoil.2015.05.006
- Hodgon, L. (2008). *Faire grimper des plantes sur un murs*. Repéré sur le site de La Presse, section Jardiner : <http://www.lapresse.ca/maison/cour-et-jardin/jardiner/200805/10/01-872072-faire-grimper-des-plantes-sur-un-mur.php>
- Hydro-Québec (2011). *Le bon arbre au bon endroit*. Repéré sur le site d'Hydro-Québec, section Distribution : [http://www.hydroquebec.com/distribution/fr/publications/pdf/bonarbre\\_aerien.pdf](http://www.hydroquebec.com/distribution/fr/publications/pdf/bonarbre_aerien.pdf)
- Institut de la statistique du Québec (2014). *Territoire*. Repéré sur le site de l'Institut de la statistique du Québec, section Statistiques : [http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/quebec\\_statistique/ter\\_ter/ter\\_ter\\_3.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/quebec_statistique/ter_ter/ter_ter_3.htm)
- Jacquet (2011) *Performance énergétique d'une toiture végétale au centre-ville de Montréal*. Repéré sur le site du Centre d'écologie urbaine de Montréal (CEUM), section Documents : [http://www.ecologieurbaine.net/documents/resume\\_etude\\_de\\_la\\_performance\\_energetique\\_toiture\\_vegetale\\_extensive\\_installee\\_au\\_centre-ville\\_de\\_mtl.pdf](http://www.ecologieurbaine.net/documents/resume_etude_de_la_performance_energetique_toiture_vegetale_extensive_installee_au_centre-ville_de_mtl.pdf)
- Janpierre, V. (2003). *Végétalisation des bâtiments applicabilité socioéconomiques des toits et des murs végétaux au Québec*. (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Québec, Québec.
- Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., Peters, J., Olivier, J. (2015). *Trends in global CO<sub>2</sub> emissions: 2015 Report*. Repéré sur le site de European Commission, section New Documentations : [http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news\\_docs/jrc-2015-trends-in-global-co2-emissions-2015-report-98184.pdf](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2015-trends-in-global-co2-emissions-2015-report-98184.pdf)
- Keeling, C. (1998). Rewards and Penalties of Monitoring the Earth. *Annual Review of Energy and the Environment*, 23, 25-82. Repéré à [http://scrippsco2.ucsd.edu/publications/keeling\\_autobiography.pdf](http://scrippsco2.ucsd.edu/publications/keeling_autobiography.pdf)
- Kolbert, E. (2015). *La Sixième extinction : comment l'homme détruit la vie*. Laval, Québec, Canada : Guy St-Jean Éditeur.
- Kuhlberg, M., Stanton, C.R., Bouchier, R.J. (2015). *Foresterie*. Repéré sur le site de l'Encyclopédie canadienne, section Entreprise : <http://www.encyclopediecanadienne.ca/fr/article/foresterie/>
- Laberge, S. (2012). *Murs végétaux : là où le mur n'est plus un obstacle*. Repéré sur le site de Maisons saines, section Construction verte : <https://maisonsaine.ca/construction-verte/murs-vegetaux-le-mur-plus-un-obstacle.html>
- Larrivée, C., N. Sinclair-Désagné, L. Da Silva, J.P. Révéret, C. Desjarlais (2015). *Évaluation des impacts des changements climatiques et de leurs coûts pour le Québec et l'État québécois, Rapport d'étude*, Ouranos, 58 pages.
- Lawlor, G., Currie, B. A., Doshi, H., Wieditz, I. (2006). *Green Roofs: A Resource Manual for Municipal*

- Policy Makers*. Repéré sur le site de Publications du gouvernement du Canada, section Collection 2016 : [http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2016/schl-cmhc/NH18-26-4-2006-eng.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/schl-cmhc/NH18-26-4-2006-eng.pdf)
- Légaré, M., Mineau, D. (2008). Répertoire des vivaces recommandées en milieu urbain. Saint-Hyacinthe, Québec : Association québécoise des producteurs en pépinières (AQPP).
- Légaré, M., Tremblay, C. (2014). Répertoire des arbres recommandés en milieu urbain. Saint-Hyacinthe, Québec : AQPP.
- Lescurieux, R. (2015). *Paris: Découvrez les 41 murs qui seront bientôt végétalisés près de chez vous*. Repéré sur le site de 20 minutes, section Environnement : <http://www.20minutes.fr/paris/1582223-20150408-paris-decouvrez-41-murs-bientot-vegetalises-pres-chez>
- Les Toits Vertiges (2011). *Des avantages indéniables*. Repéré sur le site des Toits Vertige, section Profil : <http://www.toitsvertige.com/fr/toit-vert.php>
- Liu, C. et Li, X. (2011). Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban Forestry & Urban Greening, Vol 11 (2)*, p. 121-128
- Langlois, M., Blais, P., et Bonneville, K. (2004). *Guide de bonnes pratiques : La réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'aménagement du territoire*. Repéré sur le site du MAMOT, section Aménagement du territoire : [http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement\\_territoire/documentation/guide\\_reduction\\_gaz.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/documentation/guide_reduction_gaz.pdf)
- Luo, H., Liu, X., Anderson, B. C., Zhang, K., Li, X., Huang, B., & ... Jiang, M. (2015). Carbon sequestration potential of green roofs using mixed-sewage-sludge substrate in Chengdu World Modern Garden City. *Ecological Indicators, 49*, 247-259. doi:10.1016/j.ecolind.2014.10.016
- MDDELCC (2012). *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020*. Repéré sur le site du MDDELCC, section Plan d'actions : [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/plan\\_action/strategie-adaptation2013-2020.pdf](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/plan_action/strategie-adaptation2013-2020.pdf)
- Métier Québec (2015). Portrait de l'industrie de la construction et entretien des bâtiments, section Bâtiments et construction : <http://www.metiers-quebec.org/portraits/batiment1.htm> (pas sur si je vais le mettre)
- Med, B. et Fuchs, A. (2009). *La végétalisation des bâtiments*. Repéré sur le site de Ekopolis, section Documents : <http://www.ekopolis.fr/sites/default/files/docs-joints/RES-1209-vegetalisation-des-batiments-rapport.pdf>
- Meghan, R. (2014). Trees' growth keeps climbing with age. *Science News, 185*, 12-13. Repéré à <http://eds.b.ebscohost.com.ezproxy.usherbrooke.ca/eds/detail/detail?sid=9af79f3e-04d9-4d93-ae907fb9410682fe%40sessionmgr104&vid=1&hid=114&bdata=Jmxhbmc9ZnImc2l0ZT11ZHMtbG12ZQ%3d%3d##AN=94596155&db=a9h>
- Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMOT) (2014). *L'organisation municipale et régionale au Québec en 2014*. Repéré sur le site du MAMOT, section Organisation territoriale : [http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/organisation\\_municipale/organisation\\_territoriale/organisation\\_municipale.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/organisation_municipale/organisation_territoriale/organisation_municipale.pdf)

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2016). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2013 et leur évolution depuis 1990*. Repéré sur le site du MDDELCC, section Changements climatiques : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2013/Inventaire1990-2013.pdf>
- Mur Mure Végétal (2011). *Jardin Vertical ou Mur végétal : Les concepts de murs végétalisés*. Repéré sur le site de Mur Mure Végétal, section Mur végétal : <http://www.murmurevegetal.com/mur-vegetal/principes-mur-vegetal>
- Nations Unies (2014). *Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. Repéré sur le site du UNFCCC, section Cooperation with International Organizations : [http://unfccc.int/files/cooperation\\_and\\_support/cooperation\\_with\\_international\\_organizations/application/pdf/kpfrench.pdf](http://unfccc.int/files/cooperation_and_support/cooperation_with_international_organizations/application/pdf/kpfrench.pdf)
- Nations Unies (2014 b). *Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes – ONU*. Repéré sur le site du UNFCCC, section Département des affaires économiques et sociales : <http://www.un.org/fr/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects.html>
- Nations Unies (2015). *Accord de Paris*. Repéré sur le site du UNFCCC, section Conventions : [http://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/french\\_paris\\_agreement.pdf](http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/french_paris_agreement.pdf)
- Nature-Action (2016). *Au travail pour les corridors boisés!* Repéré sur le site de Nature-Action, section Documents : <http://nature-action.qc.ca/site/nouvelle/au-travail-pour-les-corridors-boises-resultats>
- Nature Humaine (2014). *De l'écologie à la psychologie*. Repéré sur le site de Nature Humaine, section Écopsychologie : <http://nature-humaine.fr/ressources/les-dossiers/eco-psychologie/>
- NOAA (2016). *Record annual increase of carbon dioxide observed at Mauna Loa for 2015*. Repéré sur le site du NOAA, section News and Features : <http://www.noaa.gov/record-annual-increase-carbon-dioxide-observed-mauna-loa-2015>
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 178, 229-236. doi:10.1016/j.envpol.2013.03.019
- Nowak, D. J. et Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA *Environmental Pollution*, 116(3), 381-389. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749101002147>
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 178, 229-236. doi:10.1016/j.envpol.2013.03.019
- OCDE (2007). Examens environnementaux de l'OCDE — Nouvelle-Zélande. Repéré sur le site de Keepeek, section Environment : [http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/occd/environment/examens-environnementaux-de-l-ocde-nouvelle-zelande-2007\\_9789264030909-fr#page229](http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/occd/environment/examens-environnementaux-de-l-ocde-nouvelle-zelande-2007_9789264030909-fr#page229)

- OECD (2014). Environmental Performance Reviews Sweden. Repéré sur le site de l'OECD, section Country Reviews : <https://www.oecd.org/environment/country-reviews/Sweden%20Highlights%20web%20pages2.pdf>
- OCDE (2015), *Examens environnementaux de l'OCDE : Suède 2014*, Repéré sur le site de l'OCDE, section Examens environnementaux de l'OCDE : <http://dx.doi.org/10.1787/9789264227248-fr>
- OSS (2013). *Estimation du potentiel de séquestration du carbone au Mali*. Repéré sur le site de l'OSS, section Projets : [http://www.oss-online.org/sites/default/files/projet/2\\_guide\\_sequstration.pdf](http://www.oss-online.org/sites/default/files/projet/2_guide_sequstration.pdf)
- Pasher, J., McGovern, M., Khoury, M., & Duffe, J. (2014). Assessing carbon storage and sequestration by Canada's urban forests using high resolution earth observation data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 484-494. doi:10.1016/j.ufug.2014.05.001
- Patterson, J. (2013). *De l'avantage et des bienfaits des toits verts en ville*. Repéré sur le site de l'Association des architectes paysagistes du Québec, section Paysages : [https://aapq.org/sites/aapq.org/files/bibliotheque/AAPQ\\_Paysages2013\\_Article\\_JPatterson.pdf](https://aapq.org/sites/aapq.org/files/bibliotheque/AAPQ_Paysages2013_Article_JPatterson.pdf)
- Peck, S., Steven, W., Callaghan C., Monica E., Kuhn M. et Bass B. (1999). *Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada*. *Société canadienne d'hypothèques et de logement*, 78 p.
- Peck, S., Kuhn, M. (s. d.). *Lignes directrices de conception de toits verts*. Repéré sur le site du Conseil de l'enveloppe du bâtiment du Québec (CEBQ), section Documents : <http://www.cebq.org/documents/Lignesdirectricesdeconceptiondetoitsverts.pdf>
- Pelosse, L. (2011). *Promotion de la santé environnementale*. Repéré sur le site de l'IREPS Rhône-Alpes, Section Publications : [http://education-sante-ra.org/publications/2011/promotion\\_sante\\_environnement.pdf](http://education-sante-ra.org/publications/2011/promotion_sante_environnement.pdf)
- Pereira, T. (2008). *Les toits verts : un outil efficace de développement durable*. (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à [https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2011/Terrie\\_Pereira\\_ESSAI\\_de\\_Maitrise\\_en\\_environnement\\_Version\\_finale\\_23\\_sept\\_2008.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2011/Terrie_Pereira_ESSAI_de_Maitrise_en_environnement_Version_finale_23_sept_2008.pdf)
- Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building And Environment*, 70, 110-121. doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.012
- Planetoscope (2012). Plantation d'arbres dans le monde. Repéré sur le site de Planetoscope, section Forêts : <http://www.planetoscope.com/forets/1817-plantation-d-arbres-dans-le-monde.html>
- Proulx, M.-U. (2002). *L'économie des territoires au Québec*. Sainte-Foy, Québec, Canada : Presse de l'Université du Québec.
- Raubenheimer, S. (2015). Climate Change Mitigation in Developing Countries. Repéré sur le site de Coursera, section Introduction: [https://d3c33hcgivew3.cloudfront.net/\\_4c0e97bab87f24c18528de6e74ec0ab3\\_CCM-Transcript-Week2-Video1-Introduction.pdf?Expires=1474416000&Signature=FhqUqfIH~KqOduRycg8x5vyVII-9DZZboMd1K6dWZDLzbWKC1J3Zb0BMZ7Owzr1daBZDN5BI36mss3SRUI6ZJ26L6MI1sAXxqdsabr~xJTtwQpTfrdN8523MAVkkdYIMOp6LYegGa2Ej9WZcyVW71lmyRoWfOt8Tn7VpgrTULbE\\_&Key-Pair-Id=APKAJLTNE6QMUY6HBC5A](https://d3c33hcgivew3.cloudfront.net/_4c0e97bab87f24c18528de6e74ec0ab3_CCM-Transcript-Week2-Video1-Introduction.pdf?Expires=1474416000&Signature=FhqUqfIH~KqOduRycg8x5vyVII-9DZZboMd1K6dWZDLzbWKC1J3Zb0BMZ7Owzr1daBZDN5BI36mss3SRUI6ZJ26L6MI1sAXxqdsabr~xJTtwQpTfrdN8523MAVkkdYIMOp6LYegGa2Ej9WZcyVW71lmyRoWfOt8Tn7VpgrTULbE_&Key-Pair-Id=APKAJLTNE6QMUY6HBC5A)

- Réseau Ecole et Nature (2013). Le syndrome de manque de nature. Repéré sur le site de Réseau Ecole et Nature, section Ressources partagées:  
[http://reseauecoleetnature.org/system/files/le\\_syndrome\\_de\\_manque\\_de\\_nature-130925.pdf](http://reseauecoleetnature.org/system/files/le_syndrome_de_manque_de_nature-130925.pdf)
- Ressources naturelles Canada (RNC) (2012). *Enquête sur l'utilisation de l'énergie par les ménages*, Repéré sur le site de RNC, section Office de l'efficacité énergétique :<http://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/euem07/feuilleterenseignements/sommaire.cfm?attr=0>
- Ressources naturelles Canada (2016). *Agrile du frêne*. Repéré sur le site de RNC, section Forêts :  
<http://www.nrcan.gc.ca/forets/feux-insectes-perturbations/principaux-insectes/13378>
- Robert, M. et Saugier, S. (2004). Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration de carbone. *Edafologia*, 11, 45-65. Repéré à : <http://www.secs.com.es/data/Revista%20edafo/11-1/articulo%204.pdf>
- Rømø, D. (2012). *International Green Roofs Policies*. Repéré sur le site de Living Groofs World, section Green Roofs Policies : <http://livingroofsworld.com/page22.php>
- Rosen (2015). Une perspective historique des forêts urbaines au Canada. Repéré sur le site de ArbresCanada, section Série sur les forêts urbaines : [https://treecanada.ca/files/2714/2798/4721/Une\\_perspective\\_historique\\_des\\_forets\\_urbaines\\_au\\_Canada\\_MRosen2015.pdf](https://treecanada.ca/files/2714/2798/4721/Une_perspective_historique_des_forets_urbaines_au_Canada_MRosen2015.pdf)
- Roulet, N. T., Freedman, B. (2008). Meilleurs amis. Repéré sur le site d'Arbres Canada, section Dossiers :  
[https://treecanada.ca/files/6313/4885/1381/Atmospheric\\_CO2\\_80218\\_Fre.pdf](https://treecanada.ca/files/6313/4885/1381/Atmospheric_CO2_80218_Fre.pdf)
- Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2010). *Convention sur la diversité biologique*. Repéré sur le site de Convention sur la diversité biologique, section Médias :  
<https://www.cbd.int/undb/media/factsheets/undb-factsheets-fr-web.pdf>
- Sémery, D. (2012). *Réfection de toiture*. Repéré sur le site de Télé-Québec, section Légitime dépense :  
<http://legitimedepense.telequebec.tv/occurrence.aspx?id=361>
- Solidarité rurale du Québec (2016). Territoire et Démographie. Repéré sur le site de Solidarité rurale du Québec, section Ruralité : <http://www.ruralite.qc.ca/fr/ruralite/territoire-et-demographie>
- Statistique Canada (2013). *Population urbaine et rurale, par province et territoire*. Repéré sur le site de Statistique Canada, section Tableaux sommaires : <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/102/cst01/demo62f-fra.htm>
- Statistique Canada (2015). *Centre de population (CTRPOP)*. Repéré sur le site de Statistique Canada, section Dictionnaire du recensement : <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/ref/dict/geo049a-fra.cfm>
- Statistique Canada (2016). *Série « Perspective géographique », Recensement de 2011*. Repéré sur le site de Statistique Canada, section Produits de données : <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/as-sa/fogs-spg/Facts-pr-fra.cfm?Lang=fra&GK=PR&GC=24>
- Synnet, C. (2009). *Le marché volontaire du carbone en Amérique du Nord : analyses et choix stratégiques pour les organisations* (Essai de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à [https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2009/Synnett\\_C\\_13-07-09.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2009/Synnett_C_13-07-09.pdf)

- Toits Verts (2015). *Toit vert*. Repéré sur le site de Toit Vert, section Type de toit : <http://www.toitvert.net/fr/toit-vert>
- Toronto Municipal Code (2013). *Chapter 492, Green Roofs*, Repéré sur le site de la ville de Toronto, section Municipal Code : [http://www.toronto.ca/legdocs/municode/1184\\_492.pdf](http://www.toronto.ca/legdocs/municode/1184_492.pdf)
- Trees Atlanta (2016a). *Sowing the seeds of stewardship through planting, conservation, and education programs*. Repéré sur le site de Trees Atlanta, section Our Programs : <https://treesatlanta.org/our-programs/>
- Trees Atlanta (2016b). *Preserving our natural forest, one neighborhood at a time*. Repéré sur le site de Trees Atlanta, section Our Programs : <https://treesatlanta.org/our-programs/neighborhoods/>
- Trees Atlanta (2016c). *Education is at the core of the Trees Atlanta mission*. Repéré sur le site de Trees Atlanta, section Our Programs : <https://treesatlanta.org/our-programs/adult-education-4/>
- Trees Atlanta (2016d). *Teaching our youth to be good stewards*. Repéré sur le site de Trees Atlanta, section Our Programs : <https://treesatlanta.org/our-programs/youth-education/>
- Vergriete Y., Labrecque M. (2007). *Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais*. Repéré sur le site d'Agri-Réseau, section Horticulture ornementale - pépinière : <https://www.agrireseau.net/horticulture-pepinier/documents/pdf891.pdf>
- Ville de Blainville (2014). Programme de plantation d'arbres pour nouvelles résidences. Repéré sur le site de la ville de Blainville, section PDF : <http://www.blainville.ca/pdf/ProgrPlantationArbresNouvellesMaisons.pdf>
- Ville de Montréal (2012). *Le Plan d'Action Canopée ... pour faire passer l'indice de canopée de 20 % à 25 % d'ici 2025*. Repéré sur le site de la ville de Montréal, section Documents : [http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/GRANDS\\_PARCS\\_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PAC\\_JUIN\\_2012\\_FINAL.PDF](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/GRANDS_PARCS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PAC_JUIN_2012_FINAL.PDF)
- Whittinghill, L. J., Rowe, D. B., Schutzki, R., & Cregg, B. M. (2014). Research Paper: Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. *Landscape And Urban Planning*, 123, 41-48. doi:10.1016/j.landurbplan.2013.11.015
- X-Rates (2016). *Monthly Average : Euro per 1 Canadian Dollar Monthly average*. Repéré sur le site de X-Rates, section Monthly Average : <http://www.x-rates.com/average/?from=CAD&to=EUR&amount=1&year=2013>
- Yeung, K. (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 127-134. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609014000211>
- Zhao, M., Kong, Z., Escobedo, F. J., & Gao, J. (2010). Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal Of Environmental Management*, 91, 807-813. doi:10.1016/j.jenvman.2009.10.010