



24/09/2024

Le rôle des solutions climatiques fondées sur la nature dans l'atteinte de la carboneutralité de la ville de Montréal d'ici 2050

Mémoire déposé dans le cadre de la
consultation du Plan d'urbanisme et de
mobilité



Daniel Boudreau

ADMINISTRATEUR DE LA SOCIÉTÉ QUÉBÉCOISE DE
PHYTOTECHNOLOGIE,
MEMBRE FONDATEUR DE L'ALLIANCE QUÉBÉCOISE DES
SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE

Avant-propos

L'élaboration du nouveau Plan d'urbanisme et de mobilité (PUM) de Montréal s'inscrit dans le contexte de l'urgence climatique et de l'érosion de la biodiversité à l'échelle planétaire nécessitant des changements collectifs vers la transition écologique. Dans la continuité de l'adoption de son Plan stratégique Montréal 2030, Montréal affirme donc la nécessité d'engager l'aménagement du territoire et de la mobilité dans une transition écologique équitable afin de contribuer à :

- Lutter contre les changements climatiques et l'effondrement de la biodiversité;
- Réduire les inégalités sociales et territoriales;
- Mettre de l'avant la santé et le bien-être dans toutes les approches de planification.

Le PUM s'inscrit dans la lignée de différents plans et politiques venant définir les grandes ambitions guidant l'action publique en matière de transition écologique, de lutte contre les changements climatiques, d'équité et d'inclusion. Par son rôle structurant et intégrateur, il est l'outil permettant de traduire sur le territoire les grandes orientations et cibles qui y sont définies, dont l'atteinte de la carboneutralité en 2050.

Avec ce Plan, la Ville se fixe comme cible de réduire d'au moins 55 % ses émissions de GES d'ici 2030 et d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Montréal s'engage également en faveur des solutions fondées sur la nature pour accroître sa résilience climatique et favoriser la biodiversité. Elle vise plusieurs objectifs, dont le maintien et le développement de la canopée, le renforcement du verdissement, la création de nouveaux parcs, de corridors verts et de milieux humides et l'augmentation des milieux naturels protégés à 10 % du territoire.

La transition écologique et les solutions fondées sur la nature, incluant le rehaussement de la biodiversité, visent à poser des gestes concrets pour transformer les façons d'aménager le territoire et la mobilité. Elles visent notamment à adapter les espaces afin de répondre aux aléas climatiques, à réduire les sources de perturbation du vivant et des habitats, comme l'artificialisation des sols, la pollution et la fragmentation des milieux naturels, puis à protéger et à restaurer les écosystèmes.

Ce mémoire a donc été rédigé avec comme objectif d'aider la ville de Montréal à concrétiser sa vision d'une ville verte, juste et résiliente afin d'atteindre ses objectifs de zéro émission nette de carbone. Il vise ainsi à mieux documenter le rôle et la contribution des solutions fondées sur la nature plus spécifiquement dans l'élimination et le stockage du carbone dans la végétation urbaine, les sols et le biochar.

La portée de ce mémoire va au-delà de l'évaluation de la contribution de ces options à la séquestration du carbone, mais tient également compte de leurs impacts sur le bien-être de la population.

Résumé exécutif

Les villes abritent plus de la moitié de la population mondiale, et les projections prévoient une augmentation à 68 % de la population urbaine d'ici 2050. Les zones urbaines sont toutefois responsables d'une part plus importante des émissions mondiales de gaz à effet de serre, estimées à 75 % des émissions totales alors qu'elles ne représentent que <2 % de la surface terrestre de la Terre.

À l'intérieur de leurs frontières, les villes peuvent saisir les opportunités de renforcer leur capacité naturelle à améliorer les puits de carbone locaux et à réduire leur dépendance aux infrastructures énergétiques fossiles. Nombre de ces solutions d'atténuation du changement climatique, comme la plantation d'arbres et les toits végétalisés (verts), présentent des avantages connexes, comme la réduction de la chaleur urbaine et de la pollution atmosphérique.

Ce mémoire vise donc à aider la ville de Montréal à élaborer sa vision d'une ville verte, juste et résiliente afin qu'elle atteigne d'ici 2050 ses objectifs de zéro émission nette de carbone. Il examine donc le potentiel de l'élimination et du stockage du carbone atmosphérique dans la végétation urbaine et les sols par la contribution des solutions fondées sur la nature et du biochar.

La séquestration du carbone par photosynthèse naturelle dans les zones urbaines peut se faire par le biais de diverses formes de végétation. Les phytotechnologies ou solutions fondées sur la nature (SFN) dans les villes comprennent les espaces verts urbains tels que les forêts, les parcs, les arbres de rue, les jardins et les zones de conservation de la nature, ainsi que les infrastructures végétalisées (vertes) de gestion des eaux pluviales, à savoir les toits, les façades et les murs végétalisés, les jardins pluviaux ainsi que les fossés ou noues végétalisés.

Les sections suivantes du mémoire se penchent sur le mécanisme de séquestration du carbone et le potentiel de chaque milieu de stockage en examinant et en rapportant une partie de la littérature scientifique pertinente.

Empreinte carbone de diverses technologies de gestion des eaux pluviales végétalisées

Les systèmes de gestion durable des eaux pluviales ont évolué pour atténuer les impacts environnementaux des eaux pluviales. Contrairement aux infrastructures grises traditionnelles telles que les systèmes de canalisations artificielles, ces solutions durables utilisent des processus naturels dans la végétation et les sols pour retenir, traiter et évacuer le ruissellement des eaux pluviales.

Dans une métaanalyse, l'empreinte carbone nette du cycle de vie de diverses technologies de gestion des eaux pluviales végétalisées, à savoir les toits verts, les jardins de pluie, les bassins de biorétention, les fossés végétalisés et les étangs d'eaux pluviales, a été analysée, y compris leur potentiel de séquestration du carbone.

En raison des taux élevés de séquestration du carbone pour les jardins de pluie, ils se révèlent être un puits de carbone et ont la plus faible empreinte carbone nette de $-12,6 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$ sur une durée de vie de 30 ans. L'empreinte carbone nette des bassins de biorétention, des étangs d'eaux pluviales et des rigoles végétalisées s'élève respectivement à 28,7, 108,9 et 10,5 $\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$ sur une durée de vie de 30 ans. De plus, l'empreinte carbone nette sur 40 ans des toits verts s'élève à 27,3 $\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$.

Fixation du carbone dans les arbres de rue et les forêts urbaines

L'une des solutions fondées sur la nature les plus recommandées dans le contexte urbain est le développement de forêts urbaines. Le reboisement dans les zones urbaines peut augmenter le stockage et la séquestration du carbone, tout en fournissant de multiples services écosystémiques supplémentaires aux citoyens, tels que la modification du climat urbain par la transpiration des arbres et le refroidissement par évaporation, l'amélioration de la qualité de l'air par l'absorption et le dépôt de polluants, la protection contre les inondations par une perméabilité accrue du sol.

Cependant les arbres de rue doivent survivre pendant plusieurs décennies pour atteindre la neutralité carbone. Ainsi dans une étude réalisée à Boston, malgré la croissance accrue des arbres urbains, les pertes de mortalité élevées entraînent une perte nette de stockage de carbone dans les arbres de rue au fil du temps ($-0,15 \pm 0,09 \text{ Mg C/ha/an}$). Les initiatives visant à aider à l'établissement et à la préservation de la santé des arbres sont donc essentielles pour augmenter la couverture de la canopée des arbres de rue et maintenir/augmenter le stockage de carbone dans la végétation.

Faisabilité du reboisement dans les zones urbaines afin de réduire la température

Bien que les solutions fondées sur la nature pour atténuer la chaleur urbaine aient pris de l'ampleur, il est important d'évaluer quantitativement la faisabilité de telles stratégies afin de donner la priorité aux communautés à faible revenu, qui ont moins d'options pour s'adapter au changement climatique.

La température plus élevée dans les villes par rapport aux zones environnantes, est généralement une conséquence du remplacement des surfaces naturelles par des zones bâties, est associée à une augmentation de la mortalité liées à la chaleur. Étant donné que la proportion d'humains résidant dans les villes et les températures urbaines devraient augmenter à l'avenir, les zones urbaines doivent être à l'avant-garde de l'adaptation au changement climatique et de son atténuation.

Parmi les nombreuses stratégies d'atténuation de la chaleur urbaine proposées, le boisement est une solution basée sur la nature avec de multiples cobénéfices et, si elle est mise en œuvre de manière stratégique, elle permettrait de séquestrer le carbone, de modérer la pollution de l'air, de réduire la demande énergétique, de modérer les impacts sur la santé pendant les mois chauds de l'été et de remédier à d'autres disparités environnementales.

Dans une étude sur les terres urbaines disponibles en Californie, les auteurs ont étudié les disparités dans l'indice de température de surface du sol urbain et la couverture forestière afin de fournir un outil pour prioriser stratégiquement le reboisement urbain au sein d'une ville en comblant simultanément l'écart entre les arbres et en réduisant l'indice de température de surface du sol urbain. Cette approche a été réalisée pour la Californie, qui connaît une crise climatique avec de vastes vagues de chaleur pendant l'été, les communautés à faible revenu et vulnérables étant touchées de manière disproportionnée.

Les auteurs ont constaté que les quartiers pauvres de Californie ont 5,9 % de couverture arborée en moins et une intensité de l'indice de température de surface du sol urbain estivale de 1,7 °C supérieure à celle des quartiers riches. Cet écart dans la couverture forestière peut être partiellement réduit grâce à un reboisement urbain ciblé, qui, dans un scénario idéal, réduirait l'intensité moyenne de l'indice de température de surface du sol urbain en été de 1,8 °C.

La réduction de l'indice de température de surface du sol urbain est un avantage direct du reboisement urbain et permet de remédier partiellement aux disparités d'exposition potentielle à la chaleur dans les villes.

D'après les estimations, la séquestration annuelle nette de carbone par le biais du reboisement serait respectivement de 4,5, 0,8 et 2 millions de tonnes de CO₂, selon les scénarios étudiés en Californie. Cela correspond à des bénéfices annuels nets allant de 198 millions à 1,1 milliard de dollars.

Mise en œuvre simultanément de plusieurs solutions fondées sur la nature

Les villes peuvent aussi mettre en œuvre simultanément plusieurs solutions fondées sur la nature (SFN) pour maximiser leurs avantages en matière de climat et de bien-être. Les SFN peuvent notamment contribuer à adapter les villes au changement climatique, l'un des principaux défis auxquels les zones urbaines seront confrontées dans les décennies à venir. Le défi consiste désormais à passer des projets de démonstration à un déploiement à grande échelle des solutions fondées sur la nature. Cela nécessite d'agir sur des facteurs externes tels que les cadres réglementaires, les normes, les modèles commerciaux et financiers et l'acceptation sociétale de ces solutions.

Dans une étude, les auteurs ont sélectionné trois villes européennes et développé six scénarios qui simulent la situation actuelle et la mise en œuvre à grande échelle de différentes stratégies de SFN (c'est-à-dire l'installation de toits verts, la perméabilité des aires de stationnement, l'amélioration de la végétation dans les parcs urbains et la plantation d'arbres de rue), et une combinaison de ces dernières.

L'installation de toits verts a le plus grand potentiel pour réduire le ruissellement et augmenter la biodiversité, tandis que la plantation de plus d'arbres – soit le long des rues, soit dans les parcs urbains existants – produit le plus grand impact sur l'atténuation de la chaleur et la verdure. Dans les trois villes, la classe d'occupation du sol des zones industrielles et commerciales est celle qui contribue le plus aux scénarios toits verts et aires de stationnement. Même si cette classe d'occupation du sol ne couvre qu'environ 20 % des zones urbanisées, plus

de la moitié des surfaces pouvant être converties en toitures végétalisées et en zones de stationnement perméables s'y trouvent.

Verdissement des parkings dans la province du Cap-Oriental, en Afrique du Sud

Les parkings sont généralement considérés comme des zones esthétiquement peu attrayantes dans le paysage urbain. Les avantages des arbres dans les paysages urbains s'appliquent également aux zones de stationnement. Les arbres dans les parkings brisent l'étendue du bitume et abaissent la température de l'air, ce qui en fait un environnement plus agréable pour se garer. En moyenne, les sites urbains avec des arbres sont de deux à quatre degrés plus frais que ceux qui n'en ont pas.

Dans une étude dans la province de Cap-Oriental en Afrique du Sud, on a évalué l'ampleur actuelle de la plantation d'arbres dans les parkings des zones commerciales. La séquestration annuelle moyenne de carbone par unité de surface de stationnement était de $1,4 \pm 25$ t/C/ha/an. La majorité des stationnements (22 sur 28) séquestraient < 2 t/ha par an. Si des densités de plantation de 66 arbres/ha étaient atteintes dans l'ensemble des parcs de stationnement de toutes les zones urbaines de la province, les taux de séquestration pourraient être augmentés à environ 539 t C/an.

Potentiel de stockage du carbone grâce à la conversion des pelouses en paysages arborés

Dans une méta-analyse de 65 études, on a examiné le potentiel de stockage du carbone dans l'herbe tondue par rapport à celui fourni par d'autres types de végétation.

Les auteurs concluent que l'herbe tondue apporte dans presque tous les cas une contribution négative (libération de carbone) lorsque les émissions associées à l'entretien des pelouses sont prises en compte. D'autres formes de couverture végétale, telles que les arbustes et les arbres, stockent beaucoup plus de carbone, à la fois sous et au-dessus du sol. Les auteurs recommandent donc des changements radicaux dans les paramètres politiques pour maximiser la conversion de l'herbe tondue en arbustes, arbres ou végétation mixte.

Si un tiers des pelouses des zones urbaines pouvait être converti en couverture arborée, les auteurs estiment que 0,31 à 1,63 Gt de carbone pourraient être séquestrées sur deux décennies. L'estimation peut être ambitieuse, mais même un dixième de ces chiffres serait substantiel. Enfin, les nombreux avantages connexes des arbres, notamment pour la santé humaine et la biodiversité, plaident fortement en faveur d'une reconsidération de l'utilisation des sols urbains.

Potentiel mondial de compensation des émissions de carbone urbaines grâce à la reforestation

Le potentiel d'atténuation du changement climatique des solutions urbaines fondées sur la nature (SFN) est souvent perçu comme insignifiant et donc négligé, car les villes recherchent principalement des SFN pour les services écosystémiques locaux.

Dans une étude, le potentiel de la reforestation urbaine à l'échelle mondiale a été modélisé. Selon les auteurs $10,9 \pm 2,8$ Mha de terres (17,6 % de toutes les zones urbaines) sont propices à la reforestation, ce qui compenserait $82,4 \pm 25,7$ MtCO₂/eq/an d'émissions de carbone. Parmi les villes analysées, 1189 sont potentiellement en mesure de compenser > 25 % de leurs émissions de carbone urbaines grâce à la reforestation. Les solutions climatiques naturelles urbaines devraient trouver une place dans les agendas mondiaux et locaux.

Biochar et stockage du carbone dans les sols

Les sols sont reconnus non seulement pour leur potentiel de séquestration du carbone, mais aussi comme moyen de stockage lorsqu'ils sont associés à des amendements de biochar. Le biochar est une matière carbonée issue du traitement thermo-chimique de la biomasse à haute température dans un environnement privé d'oxygène. Son potentiel en tant que technologie d'émissions négatives provient de la stabilisation du carbone biogénique retiré de l'atmosphère par la matière organique à partir de laquelle le biochar est produit. Au-delà de son potentiel de stockage de carbone, le biochar est utilisé comme amendement du sol en raison de ses grandes capacités de rétention d'eau et de nutriments.

Les propriétés d'amendement du sol au biochar placent ce matériau riche en carbone comme un excellent candidat pour améliorer la productivité de la végétation dans les villes. C'est dans ce contexte que le stockage du carbone des sols urbains peut être encore augmenté en ajoutant du biochar dans le milieu de culture.

Dans une étude menée à Helsinki, on a estimé le potentiel de séquestration et de stockage du carbone des arbres et du biochar amendé dans le milieu de culture (ou la terre végétale) dans les cours résidentielles. En particulier, le sol additionné de biochar peut être une méthode efficace pour augmenter le potentiel de stockage du carbone. De plus, les arbres urbains peuvent contribuer de manière significative à la séquestration du carbone à long terme. La longue durée de vie des arbres urbains doit être garantie car la capacité de séquestration du carbone augmente à mesure que les arbres mûrissent.

L'étude recommande que des outils de planification de la durabilité soient développés afin de mieux prendre en compte le potentiel de séquestration du carbone, en mettant l'accent sur le sol. Cela conduirait à une situation gagnant-gagnant, car un sol de haute qualité améliore la qualité de l'infrastructure verte, qui à son tour a la capacité de fournir plusieurs services écosystémiques. Les résultats de l'étude suggèrent que le carbone actuel des sites résidentiels pourrait être augmenté jusqu'à 450 % en développant une planification verte afin qu'elle prenne mieux en compte ces aspects.

Conclusion

Au-delà de leur fonction de puits de carbone, les espaces verts urbains créent des possibilités accrues de loisirs et de sports, ce qui a un impact bénéfique sur les individus et les communautés physiquement, psychologiquement et socio-économiquement. Les arbres de rue et les infrastructures vertes dans les villes contribuent à sensibiliser au rôle clé de la nature dans la lutte contre le changement climatique tout en répondant à l'anxiété croissante face à l'urbanisation rapide et à la détérioration de la qualité de l'environnement.

De même, le déploiement d'un réseau connecté d'espaces verts dans l'ensemble des infrastructures de la ville pourrait favoriser le transport actif, améliorant ainsi la qualité de l'air tout en réduisant les émissions. Les synergies entre la végétation et les stratégies de décarbonation des villes découlent également des avantages rafraîchissants des espaces verts fournis par l'ombrage, réduisant ainsi la demande d'énergie de refroidissement dans les bâtiments. Les mécanismes d'évapotranspiration de la végétation urbaine peuvent également contribuer à lutter contre la mortalité liée à la chaleur dans les villes en abaissant les températures de surface et de l'air des zones urbaines.

Par ailleurs, les effets bénéfiques de la végétation urbaine peuvent être encore amplifiés par l'ajout de biochar aux substrats urbains, favorisant la fertilité des sols et donc la prospérité des arbres de rue et des toits verts dans un environnement de croissance autrement difficile.

Recommandations générales

En raison de son rôle important dans la réduction du ruissellement et de son impact positif sur la biodiversité, la mise en place d'une réglementation forçant l'installation de toits verts sur toutes les nouvelles constructions commerciale et industrielle seraient fortement à considérer.

Les arbres de rue constituent aussi une excellente solution fondée sur la nature pour l'atténuation de la chaleur et pour la verdure. Par conséquent Montréal devrait entreprendre un vaste chantier de plantation d'arbres au-delà des 500 000 prévues à l'horizon 2030 tout en se concentrant en priorité sur les secteurs les plus désavantagés afin de diminuer le taux de mortalité des populations les plus vulnérables.

Montréal aurait aussi tout intérêt à quantifier la séquestration du carbone potentiel et réel associée à la plantation de nouveaux arbres et des autres solutions fondées sur la nature devrait afin d'intégrer le tout dans son bilan carbone.

Montréal aurait donc tout intérêt à mettre en place un programme d'entretien et de survie de ses arbres de rues afin de maximiser la séquestration du carbone de cette solution fondée sur la nature.

Montréal devrait envisager d'introduire des politiques visant à réglementer ou à encourager la conversion des zones d'herbe tondue sans arbres en zones arbustives et/ou en paysages arborés, en éliminant l'herbe tondue autant que possible et, lorsque les circonstances l'exigent, en conservant les arbres avec un minimum d'herbe

Enfin, Montréal aurait tout intérêt à envisager l'intégration du biochar dans sa stratégie de carboneutralité.

Table des matières

Avant-propos	1
Résumé exécutif	2
1 Introduction.....	7
1.1 La végétalisation de Montréal et la séquestration du carbone sont des incontournables pour l'atteinte de la carboneutralité en 2050	7
2 Caractéristique des options d'élimination du carbone en milieu urbain.....	8
2.1 Impacts de l'augmentation du CO2.....	9
2.2 Stockage du carbone dans la végétation urbaine	9
2.2.1 Empreinte carbone de diverses technologies de gestion des eaux pluviales végétalisées	10
2.2.2 Fixation du carbone dans les arbres de rue et les forêts urbaines	13
2.2.3 Faisabilité du reboisement comme solution fondée sur la nature dans les zones urbaines afin de réduire la température	17
2.2.4 Mise en œuvre simultanément de plusieurs solutions fondées sur la nature	20
2.2.5 Verdissement des parkings dans la province du Cap-Oriental, en Afrique du Sud	24
2.2.6 Potentiel de stockage du carbone grâce à la conversion des pelouses en paysages arborés.....	26
2.3 Potentiel mondial de compensation des émissions de carbone urbaines grâce à la reforestation	33
3 Stockage du C dans les sols	36
3.1 Biochar et stockage du carbone dans les sols	36
4 Conclusion et recommandations générales	43
4.1 Les espaces verts urbains, de nombreux cobénéfices au-delà du stockage du carbone	43
4.2 Recommandations générales	44

1 Introduction

1.1 La végétalisation de Montréal et la séquestration du carbone sont des incontournables pour l'atteinte de la carboneutralité en 2050

Les villes abritent plus de la moitié de la population mondiale, et les projections prévoient une augmentation à 68 % de la population urbaine d'ici 2050¹. Les zones urbaines sont toutefois responsables d'une part plus importante des émissions mondiales de gaz à effet de serre, estimées à 75 % des émissions totales² alors qu'elles ne représentent que <2 % de la surface terrestre de la Terre.

Pour répondre à ces défis, le rôle vital des communautés urbaines dans l'atténuation du changement climatique est de plus en plus reconnu, comme en témoignent les engagements de plus de 1000 villes mondiales à devenir carboneutres dans les décennies à venir³.

Aujourd'hui, plus de 700 villes du monde entier se sont engagées à atteindre la neutralité carbone. Cependant, la gestion de ces objectifs ambitieux n'est pas chose aisée compte tenu de la complexité des systèmes urbains. Bien que des efforts d'atténuation soient essentiels, chaque secteur devra probablement faire face à ses propres défis et nécessiter des solutions sur mesure. Quels sont donc les défis et les opportunités de la transformation des villes vers la neutralité carbone ?

Les villes sont des systèmes complexes. Elles sont composées de secteurs et d'infrastructures interdépendants et intégrés. Elles sont caractérisées par d'énormes flux d'énergie, de matières et de finances qui fournissent des biens et des services à des dizaines de milliers, voire des millions de citoyens cherchant à satisfaire une demande infinie et croissante. Ces systèmes naturels, techniques et sociaux en interaction rendent la décarbonation urbaine incroyablement difficile et pleine de compromis potentiels.

Contribuant à 80 % au produit intérieur brut (PIB) mondial, les villes sont le moteur de l'économie mondiale, mais elles sont également responsables de plus de 70 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Il est largement admis, et le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) l'a souligné, que si nous parvenons à atténuer les émissions provenant des villes, un réchauffement de 1,5 °C pourrait être à portée de main.

Les villes cherchent en effet depuis longtemps à infléchir la courbe des émissions urbaines et à accélérer l'action climatique, même en l'absence d'efforts nationaux. Un parfait exemple est l'engagement pris par les villes américaines de respecter les objectifs de température de l'Accord de Paris à la suite du retrait de l'administration Trump du pacte en 2017. En avril 2022, 100 villes de l'Union européenne se sont engagées dans une mission audacieuse pour atteindre la neutralité climatique dès 2030. Et, aujourd'hui plus de 1 123 villes, représentant plus de 50 % du PIB mondial, ont rejoint la campagne Race to Zero des Nations Unies, visant une transition rapide et profonde vers la décarbonation conformément au Pacte de Glasgow, signé lors de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques de 2021 (COP26)⁴. Montréal fait notamment partie de cette démarche, car elle a adhéré la coalition C40 cities, un réseau mondial de près de 100 maires des principales villes du monde qui sont unis dans l'action pour faire face à la crise climatique⁵.

Un consensus aussi impressionnant sur la nécessité et l'urgence d'atteindre les objectifs de zéro émission nette au niveau des villes est encourageant, tout comme la rhétorique « verte » qui émerge des maires et des chefs d'entreprise urbains. Cependant, ensemble, ces plus de 1 000 villes ne représentent que 25 % des émissions mondiales de carbone. Ce qui est plus inquiétant, c'est que, seulement 20 % des villes engagées ont fixé des objectifs de zéro émission nette, et encore moins ont défini des lignes directrices, des jalons et des indicateurs clairs pour définir leur stratégie de zéro émission nette⁶. Ces lacunes ne doivent pas nécessairement étouffer l'enthousiasme, mais elles font allusion à l'ampleur du défi de la neutralité carbone.

¹ United Nations. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. <https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-Report.pdf> (2019).

² Seto, K. C. et al. Human settlements, infrastructure and spatial planning. in Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press, 2014).

³ UNFCCC. UNFCCC Race to Zero campaign. <https://unfccc.int/climate-action/race-to-zero-campaign> (2022).

⁴ <https://climatechampions.unfccc.int/system/race-to-zero/> et https://www.c40knowledgehub.org/s/cities-race-to-zero?language=en_US

⁵ <https://www.c40.org/cities/>

⁶ <https://zerotracker.net/analysis/net-zero-stocktake-2022>

Les villes comme Montréal doivent avant tout réduire considérablement leurs émissions directes et indirectes pour ramener à zéro leurs émissions, y compris les émissions en amont et en aval liées à la consommation. Les zones urbaines étant devenues des pôles de mondialisation, la consommation de carbone des villes se produit de plus en plus au-delà de leurs frontières. En comptabilisant les émissions liées à la consommation, certaines villes, comme Portland, dans l'Oregon, ont constaté qu'elles omettaient jusqu'à deux tiers de leur empreinte carbone. Pour que l'objectif de zéro émission nette d'une ville soit crédible et significatif, les émissions hors des limites doivent être prises en compte, et la grande majorité des villes ne parviennent pas à mesurer ces points de données en raison des difficultés inhérentes à une mesure précise. Il est donc nécessaire que de multiples acteurs et groupes à différents niveaux de gouvernement coordonnent et alignent leurs intentions et leurs actions afin de travailler vers le même objectif de décarbonation.

À l'intérieur de leurs frontières, les villes peuvent saisir les opportunités de renforcer leur capacité naturelle à améliorer les puits de carbone locaux et à réduire leur dépendance aux infrastructures énergétiques fossiles. Nombre de ces solutions d'atténuation du changement climatique, comme la plantation d'arbres et les toits végétalisés (verts), présentent des avantages connexes, comme la réduction de la chaleur urbaine et de la pollution atmosphérique. La tâche est ardue, mais la neutralité carbone est désormais le principe directeur dominant de l'action climatique, et une ville comme Montréal doit mettre en œuvre des politiques et des pratiques qui la positionnerait comme un leader de la décarbonation du Québec.

Compte tenu de la complexité des défis, il n'est pas surprenant que peu de villes aient défini une feuille de route claire pour atteindre la neutralité carbone. Alors que de plus en plus de villes font chaque jour des promesses de neutralité carbone, une approche centrée sur la ville pour un avenir durable et équitable est encore possible.

Comme mentionné dans l'avant-propos, ce mémoire vise donc à aider la ville de Montréal à élaborer sa vision d'une ville verte, juste et résiliente afin qu'elle atteigne d'ici 2050 ses objectifs de zéro émission nette de carbone.

Ce mémoire examine donc le potentiel de l'élimination et du stockage du carbone atmosphérique dans la végétation urbaine et les sols par la contribution des solutions fondées sur la nature et du biochar.

La portée de ce mémoire va au-delà de l'évaluation de la contribution de ces options à la séquestration du carbone, mais tient également compte de leurs impacts sur le bien-être de la population ainsi que sur la résilience accrue des infrastructures.

2 Caractéristique des options d'élimination du carbone en milieu urbain

Il existe plusieurs interprétations de ce qu'impliquent les objectifs de neutralité carbone ou zéro émission nette, mais la pierre angulaire sous-jacente de ces engagements est que les émissions non atténuées dues aux efforts de décarbonation doivent être compensées par l'élimination du carbone de l'atmosphère⁷, une stratégie communément appelée élimination du dioxyde de carbone.

Il est connu que les émissions peuvent être compensées par l'achat de crédits d'émissions négatives - communément appelés crédits carbone - réalisés en dehors des limites de la ville, mais ici nous allons nous concentrer sur l'intérêt de la ville de Montréal à éliminer une partie de ses propres émissions par des solutions naturelles, et cela même si le nombre de surfaces disponibles dans une ville dense comme Montréal est plus limité par rapport aux zones non urbaines. Cependant, au-delà de cette perspective centrée sur le carbone, le déploiement d'un portefeuille d'options d'élimination de CO₂ à l'échelle urbaine est associé à d'importants cobénéfices tels que l'amélioration de la santé physique et psychologique humaine⁸, la réduction des températures ambiantes urbaines⁹, l'amélioration de la qualité de l'air¹⁰ et les économies d'énergie des bâtiments¹¹.

⁷ Seto, K. C. et al. From Low- to Net-Zero Carbon Cities: The Next Global Agenda. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 46, 377–415 (2021).

⁸ Marselle, M. R. et al. Urban street tree biodiversity and antidepressant prescriptions. *Sci. Rep.* 10, 22445 (2020).

⁹ Macauley, N. Impact of Carbon Sinks on Urban Heat Island Effects : Assessment Using Satellite Data in Water Scarce Region of the Thesis. (2020).

¹⁰ Aram, F., García, E. H., Solgi, E. & Mansournia, S. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 5, (2019).

¹¹ Cheela, V. R. S., John, M., Biswas, W. & Sarker, P. Combating Urban Heat Island Effect—A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies. *Buildings* 11, 93 (2021).

De façon particulière, Montréal a donc un rôle distinct à jouer dans l'initiation et la promotion de mesures de séquestration du carbone à l'échelle locale mais aussi du Québec. Sa position unique en tant que métropole suggère également que les plans d'action et la prise de décision en matière de climat sont plus faciles à mettre en œuvre qu'au niveau national ou mondial. Cela peut aussi servir à son tour d'exemple pour la coordination et la coopération locales-régionales soutenant l'intensification des actions climatiques à l'échelle du Québec et pourquoi pas du Canada.

2.1 Impacts de l'augmentation du CO2

L'augmentation des émissions de CO2 exerce un flux d'énergie supplémentaire qui déséquilibre le cycle du carbone de la Terre, empêchant les processus naturels de contrer la hausse beaucoup trop rapide des concentrations de carbone atmosphériques. Le forçage radiatif qui en résulte et qui s'exerce sur la planète augmente les températures moyennes mondiales¹². Les impacts de cet effet de réchauffement sont encore exacerbés dans les environnements urbains en raison des îlots de chaleur urbains, une conséquence notamment du manque d'espaces verts et de plans d'eau ainsi que des grandes surfaces minéralisées¹³.

Ainsi la surchauffe urbaine est documentée dans plus de 400 grandes villes du monde. De nombreuses données expérimentales montrent que l'ampleur de l'augmentation de la température moyenne peut dépasser 4-5 °C, tandis qu'au pic, elle peut dépasser 10 °C. L'augmentation des températures ambiantes a un impact sérieux sur la consommation d'énergie de refroidissement, la demande de pointe en électricité, la mortalité liées à la chaleur, la qualité de l'environnement urbain, la vulnérabilité locale et le confort. Les synergies entre îlot de chaleur urbain et vagues de chaleur augmentent encore l'amplitude de la surchauffe urbaine, y compris les propriétés thermiques des matériaux utilisés dans les villes, la chaleur anthropique libérée notamment par les unités de climatisation, la réduction des surfaces d'évaporation et un transfert turbulent réduit dans les environnements urbains denses qui rend notamment plus difficile le refroidissement nocturne¹³.

Afin de lutter contre l'augmentation des températures mondiales, le GIEC définit l'élimination du dioxyde de carbone comme des activités humaines qui éliminent le CO2 de l'atmosphère et le stockent dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques, ou dans des produits¹⁴. À l'échelle urbaine, les supports de stockage du carbone se retrouvent dans la végétation urbaine, les sols et les bâtiments.

La capture du carbone de l'atmosphère peut se faire par des processus biologiques, géochimiques ou chimiques¹⁵. Les options de séquestration du CO2 en milieu urbain ne sont pas seulement considérées comme des moyens de stockage du carbone. Le potentiel des zones urbaines dans le stockage du carbone peut aussi être intégré dans le débat plus large sur la durabilité urbaine.

Cependant, l'évaluation quantitative du potentiel d'émissions négatives de ces options est probablement encore insuffisante pour permettre l'action. La séquestration du carbone doit être pris en compte conjointement avec les effets sur le climat urbain, la santé humaine et l'adaptation aux aléas climatiques extrêmes. Ainsi, le déploiement de ces options peut aider à relever conjointement des défis urbains aussi divers que la santé et le bien-être humains, la perte de biodiversité et la construction d'infrastructures résilientes aux catastrophes¹⁶.

Les sections suivantes se penchent sur le mécanisme de séquestration du carbone et le potentiel de chaque milieu de stockage en examinant et en rapportant une partie de la littérature scientifique pertinente.

2.2 Stockage du carbone dans la végétation urbaine

La séquestration du carbone par photosynthèse naturelle dans les zones urbaines peut se faire par le biais de diverses formes de végétation. Les phytotechnologies ou solutions fondées sur la nature (SFN) dans les villes comprennent les espaces verts urbains tels que les forêts, les parcs, les arbres de rue, les jardins et les zones de

¹² Forster, P. M. et al. Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. Earth Syst. Sci. Data 15, 2295– 670 2327 (2023).

¹³ Santamouris, M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. Energy Build. 207, 109482 (2020).

¹⁴ Van Diemen, R. et al. IPCC, 2022: Annex I: Glossary. in IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2022)

¹⁵ Smith, S. M. et al. The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition. 1–108 Available at: <https://www.stateofcdr.org> (2023).

¹⁶ Keith, M. et al. A new urban narrative for sustainable development. Nat. Sustain. 1–3 (2022)

conservation de la nature, ainsi que les infrastructures végétalisées (vertes) de gestion des eaux pluviales, à savoir les toits, les façades et les murs végétalisés, les jardins pluviaux ainsi que les fossés ou noues végétalisés¹⁷.

2.2.1 Empreinte carbone de diverses technologies de gestion des eaux pluviales végétalisées

Les populations urbaines du monde entier augmentent rapidement, à tel point qu'environ 2,6 milliards de nouveaux résidents (70 %) vivront dans des villes urbaines d'ici 2050¹. Cette tendance à l'urbanisation rapide entraîne la disparition de la végétation et l'expansion des zones imperméables. Par conséquent, on observe une augmentation du ruissellement des eaux pluviales urbaines et des débits de pointe, ce qui entraîne notamment une augmentation des charges polluantes sur les systèmes de contrôle des eaux pluviales (surverse) et bien sûr des refoulement d'égouts et des inondations du réseau des rues. Montréal ne fait pas exception à cette règle avec de nombreux débordements d'égouts pluviaux dans les sous-sols et les inondations récurrentes de certains viaducs.

Les systèmes de gestion durable des eaux pluviales ont évolué pour atténuer les impacts environnementaux des eaux pluviales. Contrairement aux infrastructures grises traditionnelles telles que les systèmes de canalisations artificielles, ces solutions durables utilisent des processus naturels dans la végétation et les sols pour retenir, traiter et évacuer le ruissellement des eaux pluviales¹⁸.

Récemment, les avantages potentiels des infrastructures végétalisées ont été ciblés par plusieurs chercheurs qui se sont concentrés sur des avantages tels que l'amélioration de la qualité de l'eau, le refroidissement du climat local et la séquestration du carbone¹⁹. L'un des services écosystémiques les plus précieux pour l'atténuation du changement climatique est le stockage et la séquestration du carbone dans la biomasse aérienne et dans les sols²⁰.

La séquestration du carbone consiste au stockage à long terme du dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂) sous forme de matière organique dans le sol et dans les plantes à longue durée de vie comme les arbres²¹. Les sols végétalisés ont en général une capacité importante d'absorption et de stockage du carbone atmosphérique.

La figure 1 illustre le processus de stockage du carbone dans un bassin végétalisé qui implique le transfert latéral du carbone par l'apport d'eaux pluviales et la capture du carbone par la photosynthèse des plantes et le stockage à long terme dans le sol. En raison de ce potentiel, les systèmes de gestion pluviale végétalisés peuvent être utilisés comme un outil stratégique pour la séquestration du carbone et atténuer leur empreinte carbone totale²².

¹⁷ Kavehei, E., Jenkins, G. A., Adame, M. F. & Lemckert, C. Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94, 714 1179–1191 (2018). 715

¹⁸ USEPA. What is Green Infrastructure? United States Environ Prot Agency. <https://www.epa.gov/green-infrastructure/what-green-infrastructure>

¹⁹ E. Oberndorfer, J. Lundholm, B. Bass, R.R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnett, *et al.* Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services *Bioscience*, 57 (2007), pp. 823-833

²⁰ Z.G. Davies, J.L. Edmondson, A. Heinemeyer, J.R. Leake, K.J. Gaston Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale *J Appl Ecol*, 48 (2011), pp. 1125-1134

²¹ R. Lal Sequestering atmospheric carbon dioxide *Crit Rev Plant Sci*, 28 (2009), pp. 90-96

²² R. Lal Soil carbon sequestration to mitigate climate change *Geoderma*, 123 (2004), pp. 1-22

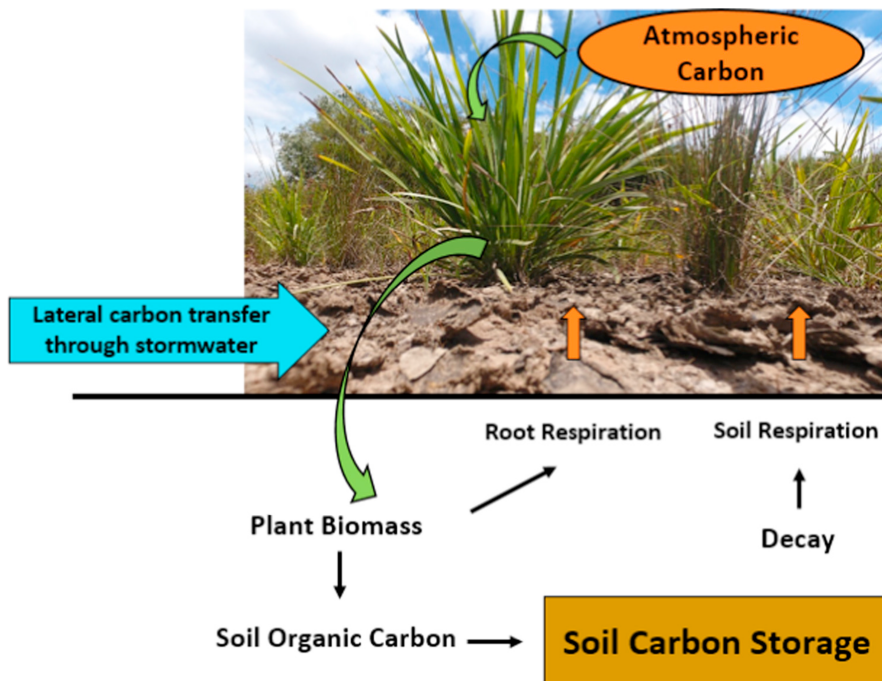


Fig. 2.1. Le processus de stockage du carbone dans les technologies de gestion des eaux pluviales végétalisées. Source : Emad Kavehei, G.A. Jenkins, M.F. Adame, C. Lemckert, Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94,

Traditionnellement, les études sur les systèmes de gestion des eaux pluviales se sont principalement concentrées sur la réduction du volume, le contrôle de l'érosion et l'amélioration de la qualité de l'eau. Au cours de la dernière décennie, l'intérêt pour l'évaluation environnementale du cycle de vie des infrastructures de gestion des eaux pluviales a augmenté. En raison de l'émergence de préoccupations liées au changement climatique, plusieurs études ont été menées sur l'évaluation de l'impact environnemental (ACV) et la fourniture de services écosystémiques par les infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil de gestion environnementale normalisé qui analyse et qualifie systématiquement une variété d'impacts et d'avantages environnementaux des produits ou des processus tout au long de leur cycle de vie. Le cycle de vie prend en compte les flux de matières et d'énergie à travers toutes les étapes d'un produit, d'un service ou d'un processus, du « berceau à la tombe », c'est-à-dire les approvisionnements directs et indirects depuis les matières premières jusqu'à la fin de vie²³.

L'empreinte carbone basé sur l'ACV est un indicateur unique du potentiel de réchauffement global. Le concept d'empreinte carbone a été introduit pour mieux comprendre la contribution des systèmes ou des processus au réchauffement climatique. Il est exprimé comme la quantité totale de gaz à effet de serre (GES) émis par un processus ou un produit. Le concept de cycle de vie de l'empreinte carbone est désormais appliqué aux infrastructures de gestion des eaux pluviales pour étudier les flux de matières et d'énergie à travers toutes les étapes de son cycle de vie²⁴.

Dans la métaanalyse de Kavehei et al. 2018²⁵, l'empreinte carbone nette du cycle de vie de diverses technologies de gestion des eaux pluviales végétalisées, à savoir les toits verts, les jardins de pluie, les bassins de biorétention, les fossés végétalisés et les étangs d'eaux pluviales, a été analysée, y compris leur potentiel de séquestration du carbone. Les études recensées ont été divisées en deux catégories soit celle d'empreinte carbone du cycle de vie et dans un deuxième celle de séquestration du carbone.

L'empreinte carbone de chaque technologie végétalisée a été évaluée à travers les quatre phases de l'analyse du cycle de vie : production de matériaux, construction, exploitation et maintenance et phases de fin de vie. Dans

²³ M.A. Curran Life-cycle assessment: principles and practice. National Risk Management Research Laboratory, Office of research and development US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH (2006)

²⁴ K.M. Flynn, R.G. Traver Green infrastructure life cycle assessment: a bio-infiltration case study Ecol Eng, 55 (2013), pp. 9-22

²⁵ Kavehei, Mad, G.A. Jenkins, M.F. Adame, C. Lemckert, Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94, 2018 ,Pages 1179-1191

cette métaanalyse, il a été démontré que les jardins de pluie offrent le potentiel de séquestration du carbone le plus élevé, ce qui compense complètement leur empreinte carbone. La séquestration du carbone dans les bassins de biorétention, les toits verts, les fossés végétalisés et les bassins d'eaux pluviales peut atténuer respectivement environ 70 %, 68 %, 45 % et 8 % de leur empreinte carbone respective.

Un résumé de l'empreinte carbone moyenne des différentes technologies végétalisées est présenté dans la figure 2.1. Les fossés végétalisés présentent la valeur la plus faible, soit 19,1 kg CO₂ eq/m², tandis que l'empreinte carbone des bassins d'eaux pluviales est la plus élevée de toutes les technologies, soit 119,3 kg CO₂ eq/m². Les bassins de biorétention et les jardins de pluie ont une empreinte carbone moyenne de 98,4 et 62,9 kg CO₂ eq/m² sur une durée de vie de 30 ans, respectivement. Ces valeurs sont d'une ampleur similaire à l'empreinte carbone des toits verts, soit 85,6 kg CO₂ eq/m², mesurée sur une durée de vie de 40 ans.

La séquestration du carbone des technologies de gestion des eaux pluviales végétalisées a également été examinée et analysée dans le cadre de cette étude, présentée sous forme de valeurs négatives dans la figure 1 (partie du bas). Les jardins de pluie et les bassins de biorétention ont le potentiel le plus élevé de séquestration du carbone, soit respectivement –75,5 et –69,7 kg CO₂ eq. m². En revanche, le potentiel de séquestration du carbone des fossés végétalisés et des bassins d'eaux pluviales est beaucoup plus faible se situant tout près de zéro.

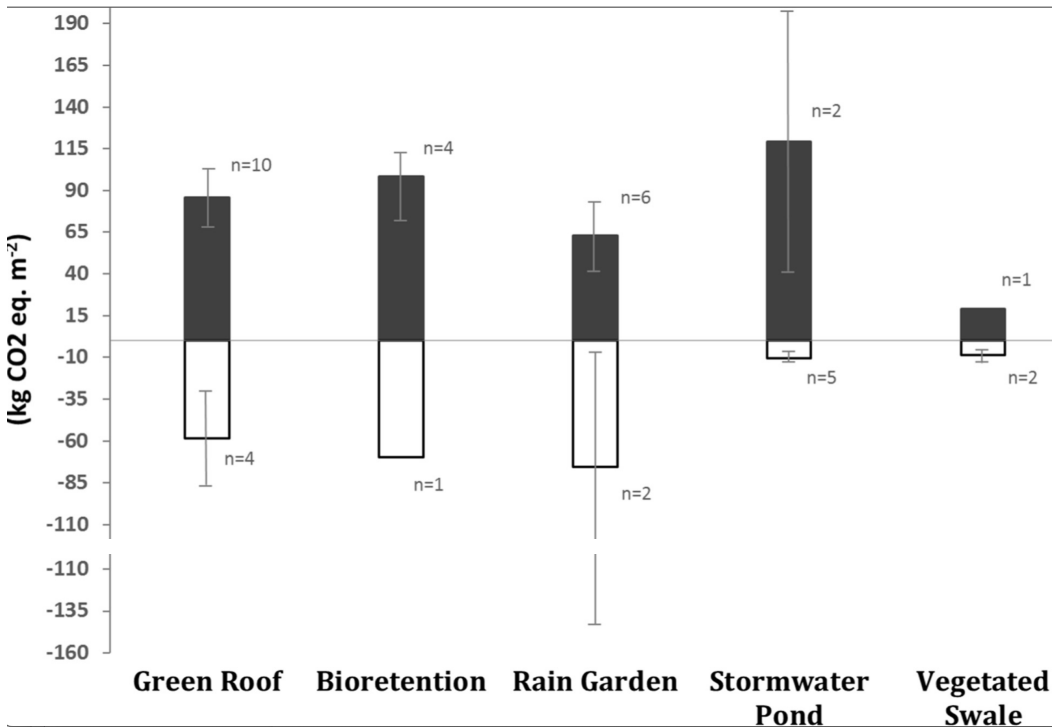


Fig.1 Empreinte carbone moyenne et séquestration moyenne du carbone de différentes technologies de gestion des eaux pluviales. Une durée de vie de 40 ans pour les toits verts et de 30 ans pour les autres technologies végétalisées.

En résumé,

La séquestration du carbone peut donc jouer un rôle très substantiel dans l'atténuation de l'empreinte carbone sur l'ensemble des étapes du cycle de vie des systèmes de gestion des eux pluviale. En raison des taux élevés de séquestration du carbone pour les jardins de pluie, ils se révèlent être un puits de carbone et ont la plus faible empreinte carbone nette de –12,6 kg CO₂ eq/m² sur une durée de vie de 30 ans. L'empreinte carbone nette des bassins de biorétention, des étangs d'eaux pluviales et des rigoles végétalisées s'élève respectivement à 28,7, 108,9 et 10,5 kg CO₂ eq/m² sur une durée de vie de 30 ans. De plus, l'empreinte carbone nette sur 40 ans des toits verts s'élève à 27,3 kg CO₂ eq/m².

Les bassins de biorétention, les toits verts, les fossés végétalisés et les bassins d'eaux pluviales fournissent également environ 70 %, 68 %, 45 % et 8 % d'atténuation du carbone respectivement. Ces résultats démontrent le potentiel d'atténuation du carbone de ces bassins sur toute leur durée de vie. Cela démontre le rôle important de la séquestration du carbone dans l'atténuation de l'empreinte carbone des technologies de gestion des eaux pluviales végétalisées.

Recommandations

La ville de Montréal aurait tout intérêt à intégrer dans sa planification et dans sa comptabilité carbone, les avantages des différentes technologies végétalisées de gestion des eaux pluviales en raison de leur faible empreinte carbone.

2.2.2 Fixation du carbone dans les arbres de rue et les forêts urbaines

Les stratégies visant à améliorer le potentiel de séquestration du carbone des zones urbaines peuvent inclure la protection, la réhabilitation ou la création d'espaces verts dans les villes²⁶ comme mentionné spécifiquement dans le PUM, ainsi que l'introduction d'une végétation présentant un potentiel d'atténuation du changement climatique plus élevé dans les espaces verts existants, comme la conversion des prairies en forêts urbaines²⁷.

L'une des solutions fondées sur la nature les plus recommandés dans le contexte urbain est le développement de forêts urbaines²⁸. Le reboisement dans les zones urbaines peut augmenter le stockage et la séquestration du carbone, tout en fournissant de multiples services écosystémiques supplémentaires aux citoyens, tels que la modification du climat urbain par la transpiration des arbres et le refroidissement par évaporation, l'amélioration de la qualité de l'air par l'absorption et le dépôt de polluants, la protection contre les inondations par une perméabilité accrue du sol²⁹. Compte tenu de l'attention croissante portée aux questions liées à l'environnement et au climat, associée au besoin croissant d'avantages sociaux, l'allocation de ressources financières aux projets de reboisement urbain a considérablement augmenté ces dernières années, ce qui a entraîné le développement de plans de forêts urbaines dans plusieurs villes.

Parmi ceux-ci, la ville de Pékin a mis en œuvre le projet de reboisement de la plaine de 666 km² entre 2012 et 2015³⁰ où plus de 50 millions d'arbres ont été plantés dans la plaine de la ville de Pékin, ce qui a entraîné une augmentation de 10 % de la couverture forestière de la ville. À New York, le programme MillionTreesNYC (<https://www.milliontreesnyc.org/>) a contribué à planter et à entretenir un million de nouveaux arbres dans les cinq arrondissements de la ville. Dans ce contexte, de nombreux représentants de villes et de municipalités ont proposé des plans de forêts urbaines visant à renforcer l'impulsion donnée aux systèmes énergétiques à faible émission de carbone, résilients et inclusifs, montrant ainsi comment chaque administration locale peut atteindre l'objectif de neutralité carbone. Par exemple, le programme en cours appelé « Forestami » (www.forestami.org) vise à planter 3 millions d'arbres d'ici 2030 dans la zone métropolitaine de Milan (Italie).

La plus grande proportion de matières ligneuses dans les arbres par rapport aux autres types de végétation urbaine met en évidence le rôle des forêts urbaines, des parcs et des arbres de rue en tant qu'approches solutions fondées sur la nature efficaces pour fixer le carbone et maximiser les avantages climatiques. De plus la nature très fragmentée des forêts urbaines par rapport aux forêts rurales en fait un puits de carbone plus puissant par unité de surface, mais aussi beaucoup plus vulnérable au réchauffement climatique.

Cependant, la quantification de la capacité de séquestration du carbone fournie par une forêt urbaine et l'évaluation de sa capacité à influencer sur le bilan carbone à l'échelle de la ville et à compenser les émissions anthropiques sont difficiles. Une telle analyse dépend de l'approche méthodologique adoptée, la quantité et la qualité des informations contenues dans la base de données sur les arbres urbains, ainsi que le niveau de détail

²⁶ Eggermont, H. et al. Nature-based Solutions: New Influence for Environmental Management and Research in Europe. GAIA - Ecol. Perspect. Sci. Soc. 24, 243–248 (2015). 719

²⁷ 2. Xi, F., Liang, W., Niu, M. & Wang, J. Carbon emissions and low-carbon regulation countermeasures of land use change in the city and town concentrated area of central Liaoning Province, China]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao J. Appl. Ecol. 27, 577–584 (2016).

²⁸ Raskin, E., Urban forests as weapons against climate change: lessons from California's global warming solutions act The Urban Lawyer, 47 (3) (2015),

²⁹ Rahman, M.A. L.M.F. Stratopoulos, A. Moser-Reischl, T. Zölch, K.H. Häberle, T. Rötzer, H. Pretzsch, S. Pauleit Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis Build. Environ., 170 (2020),

³⁰ Yao, N., C. Konijnendijk van den Bosch, J. Yang, T. Devisscher, Z. Wirtz, L. Jia, J. Duan, L. Ma Beijing's 50 million new urban trees: Strategic governance for large-scale urban afforestation Urban Forestry & Urban Greening, 44 (2019),

des plans de développement des forêts urbaines. Tous ces aspects peuvent fortement influencer le potentiel de séquestration du carbone offert par les forêts urbaines et doivent être soigneusement pris en compte pour fournir des estimations fiables de la séquestration du carbone dans un contexte urbain spécifique.

Les forêts en milieu urbain ont aussi tendance à pousser par parcelles en raison des limites d'espace. Cela augmente l'exposition à la lumière, aux nutriments et à la température par rapport à leur homologue non urbain, ce qui entraîne souvent des taux de croissance et de séquestration plus élevés dans les villes, à condition que le sol et l'eau soient disponibles³¹.

À l'échelle mondiale, les forêts des latitudes septentrionales (> 30°N) constituent probablement le plus grand puits terrestre net de carbone³². La région tempérée connaît également le déclin le plus rapide de la proportion d'habitats forestiers de tous les biomes forestiers et l'urbanisation devrait continuer d'être un facteur majeur de changement de couverture terrestre dans de nombreux pays, y compris au Canada et aux États-Unis. Par exemple, entre 2000 et 2050, l'étendue urbaine aux États-Unis devrait doubler, entourant au passage près de 120 000 km² de terres forestières adjacentes actuellement non urbaines³³.

La végétation urbaine fournit des services écosystémiques qui peuvent aider à atténuer les impacts de l'urbanisation locale en réduisant les îlots de chaleur urbain, le ruissellement de surface. Compte tenu des tendances actuelles en matière de développement et de la gamme de services potentiels fournis par les forêts urbaines, de nombreuses municipalités ont entrepris d'importants efforts de plantation d'arbres³⁴.

L'urbanisation impose une série unique de modifications aux conditions de croissance des forêts (par exemple, îlot de chaleur urbain et dépôts d'azote élevés, concentrations de CO₂ et exposition à la pollution) qui, par rapport aux conditions rurales, peuvent entraîner une croissance plus rapide des arbres, mais aussi conduire à des taux de mortalité plus élevés³⁵.

Malgré les avantages largement reconnus des arbres urbains, le rôle de la végétation urbaine dans le cycle du carbone reste incertain³⁶. Ainsi, la connaissance de la dynamique du carbone des arbres de rue, y compris l'équilibre entre la croissance, la mortalité et les taux de plantation, est limitée³⁷. Étant donné les coûts financiers et environnementaux élevés de la plantation et de l'entretien des arbres de rue et l'intérêt de plus en plus grandissant des décideurs politiques à utiliser la plantation d'arbres urbains pour les crédits carbone³⁸, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour éclairer et évaluer la viabilité et les implications carbone des initiatives de verdissement.

Les arbres de rue, contrairement à la végétation des propriétés résidentielles et commerciales, sont plantés et entretenus dans le cadre de réseaux complexes de gouvernance entre les différents secteurs d'une ville³⁹, offrant une opportunité unique mais complexe d'améliorer l'environnement urbain. La gestion des arbres de rue permet aux villes d'être à l'avant-garde dans leurs stratégies de plantation et d'entretien pour optimiser leurs objectifs de durabilité. Bien que rarement mesurés simultanément, il existe un nombre croissant de publications documentant les taux de croissance et de mortalité des arbres de rue⁴⁰.

Pourtant, dans la plupart des modèles d'écosystèmes à plus grande échelle et des initiatives de comptabilisation du carbone, les contributions de la végétation urbaine au cycle du carbone sont entièrement négligées ou paramétrées en fonction de notre connaissance des forêts rurales.

³¹ Reinmann, A. B., Smith, I. A., Thompson, J. R. & Hutyra, L. R. Urbanization and fragmentation mediate temperate forest carbon cycle response to climate. *Environ. Res. Lett.* 15, 114036 (2020).

³² Pan Y *et al* 2011 A large and persistent carbon sink in the world's forests *Science* 333 988–93

³³ Nowak D J and Walton J T 2005 Projected urban growth and its estimated impact on the U.S. forest resource (2000–2050) *J. For.* 103 383–9

³⁴ Roman LA. How many trees are enough? Tree death and the urban canopy. *Scenario Journal*. Scenario 04. 2014. 8p

³⁵ Smith I A, Dearborn V K and Hutyra L R 2019 Live fast, die young: accelerated growth, mortality, and turnover in street trees *PLoS One* 14 e0215846

³⁶ Hutyra LR, Duren R, Gurney KR, Grimm N, Kort EA, Larson E, et al. Urbanization and the carbon cycle: Current capabilities and research outlook from the natural sciences perspective. *Earth's Future*. 2014;2(10):473–95

³⁷ Nowak DJ, Kuroda M, Crane DE. Tree mortality rates and tree population projections in Baltimore, Maryland, USA. *Urban For Urban Green*. 2004.

³⁸ McHale MR, McPherson EG, Burke IC. The potential of urban tree plantings to be cost effective in credit carbon markets. *Urban For Urban Green*. 2007;6:49–60.

³⁹ Mincey SK, Hutten M, Fischer BC, Evans TP, Stewart SI, Vogt JM. Structuring institutional analysis for urban ecosystems: A key to sustainable urban forest management. *Urban Ecosyst*. 2013;16:553–571.

⁴⁰ van Doorn NS, McPherson EG. Demographic trends in Claremont California's street tree population. *Urban For Urban Green*. 2018;29:200–11.

Le rôle des arbres de rue dans le cycle du carbone urbain est complexe, car les coûts et les avantages environnementaux des arbres de rue évoluent au cours de la vie d'un arbre, les émissions associées à l'établissement empêchant souvent les avantages nets en termes de gaz à effet de serre dans les premières étapes du cycle de vie d'un arbre de rue. Ainsi, les coûts du carbone associés à la production en pépinière, à la plantation, à l'irrigation, à la taille, à l'enlèvement et à l'élimination sont élevés. Les arbres de rue doivent survivre pendant plusieurs décennies (26 à 33 ans⁴¹) pour atteindre la neutralité carbone. Il est donc nécessaire d'estimer empiriquement les taux actuels de mortalité, de plantation et de croissance pour toutes les espèces et classes de taille afin de développer des stratégies efficaces de plantation/entretien qui maximisent la proportion d'arbres de rue offrant des avantages nets en termes de carbone.

Ainsi dans une étude réalisée à Boston, Reinmann et al 2020⁴² ont trouvé des taux accélérés de cycle du carbone dans les arbres de rue avec des taux de croissance du diamètre moyen près de quatre fois plus rapides à Boston, ($0,78 \pm 0,02$ cm/an) que dans les peuplements forestiers ruraux du Massachusetts ($0,21 \pm 0,02$ cm/an). Cependant les taux de mortalité moyens étaient plus de deux fois supérieurs dans les arbres de rue ($3,06 \pm 0,25$ %/an) que dans les arbres ruraux ($1,41 \pm 0,04$ %/an). Malgré la croissance accrue des arbres urbains, les pertes de mortalité élevées entraînent une perte nette de stockage de carbone dans les arbres de rue au fil du temps ($-0,15 \pm 0,09$ Mg C/ha/an). Ainsi les initiatives de plantation à elles seules peuvent ne pas être suffisantes pour maintenir ou améliorer la couverture de la canopée et la biomasse en raison de la démographie unique des écosystèmes urbains. Les initiatives visant à aider à l'établissement et à la préservation de la santé des arbres sont donc essentielles pour augmenter la couverture de la canopée des arbres de rue et maintenir/augmenter le stockage de carbone dans la végétation.

Les efforts de verdissement urbain se concentrent souvent sur la plantation pour augmenter la couverture de la canopée, mais malgré des taux de plantation et de croissance élevés dans de nombreuses zones urbaines des États-Unis, on constate une diminution de la couverture de la canopée urbaine au fil du temps⁴³. À New York, 26,2 % des arbres de rue sont morts dans les 9 ans suivant la plantation⁴⁴ et une analyse de 11 études antérieures du monde entier suggère que la demi-vie typique de la population d'arbres de rue (le moment où la survie cumulative est de 50 %) n'est que de 13 à 20 ans⁴⁵. À Milwaukee, dans le Wisconsin, et à Denver, au Colorado, plus de 28 000 arbres ont été perdus en 5 ans, avec davantage de tiges perdues dans les quartiers plus anciens avec une couverture de canopée plus élevée⁴⁶. Dans certains cas, des taux de plantation élevés ont donc conduit à des augmentations nettes de la population d'arbres de rue, cependant, cette tendance ne signifie pas nécessairement que les villes réussissent à augmenter la biomasse ou la couverture de canopée. L'élimination de grands arbres à des fins de (re)développement est souvent justifiée par la replantation de plusieurs semis à leur place, mais les taux de mortalité élevés et le temps nécessaire à un semis pour atteindre sa pleine taille peuvent entraîner un déclin soutenu de la canopée pendant de nombreuses années.

Selon Reinmann et al. 2020⁴⁷, si l'on compare un arbre de 10 cm de diamètre à hauteur de poitrine poussant dans un paysage urbain et dans une forêt rurale intacte, l'arbre urbain atteindrait $37,7 \pm 2,9$ cm de diamètre et stockerait entre 279,2 et 398,7 kg de C après 35 ans. Le même arbre dans une forêt rurale intacte atteindrait moins de la moitié de la taille de l'arbre urbain ($15,7 \pm 0,8$ cm) après 35 ans et stockerait un ordre de grandeur inférieur de carbone (34,3–44,2 kg de C). Cependant, la probabilité que l'arbre urbain survive 35 ans n'est que de $35,1 \pm 8,6$ %, tandis que l'arbre rural a une chance de survie de $44,2 \pm 4,5$ %.

Les différences de conditions de croissance et de gestion entre les zones urbaines et rurales déterminent la dynamique du carbone de l'écosystème. Chez les jeunes arbres de rue, les opportunités de croissance

⁴¹ Petri AC, Koeser AK, Lovell ST, Ingram D. How Green Are Trees?—Using Life Cycle Assessment Methods to Assess Net Environmental Benefits. *J Environ Hort.* 2016;34(4):101–110.

⁴² Reinmann, A. B., Smith, I. A., Thompson, J. R. & Hutrya, L. R. Urbanization and fragmentation mediate temperate forest carbon cycle response to climate. *Environ. Res. Lett.* 15, 114036 (2020).

⁴³ Nowak DJ, Greenfield EJ. Tree and impervious cover change in U.S. cities. *Urban For Urban Green.* 2012;11(1):21–30.

⁴⁴ Lu JWT, Svendsen ES, Campbell LK, Greenfield J, Braden J, King KL, et al. Biological, Social, and Urban Design Factors Affecting Young Street Tree Mortality in New York City. *Cities Environ.* 2011;3.

⁴⁵ Roman LA, Scatena FN. Street tree survival rates: Meta-analysis of previous studies and application to a field survey in Philadelphia, PA, USA. *Urban For Urban Green.* 2011;10(4):269–74.

⁴⁶ Ossola A, Hopton ME. Measuring urban tree loss dynamics across residential landscapes. *Sci Total Environ.* 2018;612:940–949

⁴⁷ Reinmann, A. B., Smith, I. A., Thompson, J. R. & Hutrya, L. R. Urbanization and fragmentation mediate temperate forest carbon cycle response to climate. *Environ. Res. Lett.* 15, 114036 (2020).

comprennent une plus grande disponibilité de lumière dans des conditions de croissance ouvertes, des concentrations élevées de dioxyde de carbone (rapports de mélange de CO₂ au niveau de la rue > 500 ppm⁴⁸), un dépôt d'azote atmosphérique réactif accru (les apports d'azote atmosphérique dans les sites urbains sont plus du double des sites ruraux et une saison de croissance prolongée par rapport à une forêt rurale (18 à 22 jours de plus dans la ville de Boston par rapport aux zones rurales adjacentes⁴⁹).

Au début, les jeunes arbres dans les environnements urbains et ruraux connaissent des taux de mortalité élevés, mais pour des raisons différentes. Lorsque les arbres de rue urbains sont plantés, leurs premiers risques de mortalité sont associés à l'établissement initial des racines et à l'accès à l'eau pendant cette période critique. En revanche, pour les petits arbres régénérés naturellement, la survie et la productivité sont une fonction de la compétition pour la lumière et les nutriments. Une fois qu'un arbre rural forestier atteint l'établissement avec accès à la canopée, le risque annuel de mortalité diminue considérablement tandis que les arbres urbains de rue sont confrontés à de nouveaux risques spécifiques à leur taille, tels que la limitation de l'espace racinaire, la taille excessive, l'élagage en raison du risque de danger et les blessures occasionnées par diverses activités⁵⁰.

L'entretien et l'irrigation des arbres de rue peuvent réduire le risque de mortalité⁵¹, mais les pratiques d'entretien qui facilitent la survie et la séquestration rapide du carbone par les arbres de rue ont elles-mêmes des coûts de carbone élevés par l'utilisation de machinerie etc. En revanche, les arbres ruraux à croissance plus lente ont généralement des coûts de carbone d'entretien beaucoup plus faibles par arbre.

À Boston, les entrepreneurs offrent des garanties sur les arbres de rue et assurent désormais un entretien de base (arrosage des arbres une fois toutes les deux semaines) et des garanties de 2 ans (remplacement des arbres qui meurent dans les 2 ans suivant la plantation). Au-delà de la période de garantie, les arbres de rue sont confrontés aux risques liés à leur croissance en milieu urbain, ce qui réduit la probabilité d'une implantation réussie des arbres. Dans le cas de Boston, les efforts de plantation d'arbres à eux seuls semblent insuffisants pour augmenter la couverture forestière. L'impact de diverses stratégies de plantation et d'entretien sur la biomasse des arbres de rue montre qu'en raison de la difficulté d'établissement des jeunes arbres et du risque élevé de mortalité des grands arbres de rue, l'action municipale visant à réduire les taux de mortalité peut avoir un impact beaucoup plus important sur la biomasse totale des arbres de rue que l'augmentation du taux de plantation à elle seule.

En résumé

Dans cette étude, les auteurs constatent que grâce à des taux de croissance rapides, les arbres de rue ont la capacité de séquestrer le carbone et de fournir potentiellement d'autres services écosystémiques, tels que le refroidissement par évaporation, plus efficacement que les arbres ruraux. Actuellement, ces avantages ne sont pas pleinement réalisés en raison de la mortalité élevée subie par les arbres de rue. Des efforts de verdissement diversifiés qui non seulement plantent plus d'arbres, mais aident également à l'établissement de petits arbres et favorisent la santé et l'entretien des plus grands arbres, pourraient simultanément réduire la mortalité urbaine et maximiser les services écosystémiques des arbres de rue.

Les villes étant à l'avant-garde de la mise en œuvre de politiques d'atténuation du changement climatique réalisables pour compenser la hausse des températures et des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, il est urgent de réviser les stratégies actuelles des campagnes de verdissement pour capitaliser sur les services écosystémiques abondants et non réalisés fournis par la canopée urbaine

Les résultats suggèrent aussi que par unité de surface forestière, les forêts urbaines sont sensiblement plus productives que les forêts rurales, soulignant le rôle disproportionné que jouent les forêts urbaines dans les paysages développés. Ainsi le reboisement dans les zones urbaines peut offrir une opportunité importante

⁴⁸ Brondfield MN, Hutrya LR, Gately CK, Raciti SM, Peterson SA. Modeling and validation of on-road CO₂ emissions inventories at the urban regional scale. *Environ Pollut.* 2012;170:113–23. pmid:22776716

⁴⁹ Melaas EK, Wang JA, Miller DL, Friedl MA. Interactions between urban vegetation and surface urban heat islands: a case study in the Boston metropolitan region. *Environ Res Lett.* 2016;11(5).

⁵⁰ Roman LA, Battles JJ, McBride JR Urban tree mortality: a primer on demographic approaches. Gen. Tech. Rep. NRS-158. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 2016. 24 p

⁵¹ Roman LA, Walker LA, Martineau CM, Muffly DJ, MacQueen SA, Harris W. Stewardship matters: Case studies in establishment success of urban trees. *Urban For Urban Green.* 2015;14(4):1174–1182.

d'atténuation du changement climatique basée sur la nature et suggèrent que la force du puits de carbone des forêts urbaines pourrait être plus forte qu'on ne le pensait initialement.

Cependant, l'urbanisation et la fragmentation augmentent aussi la sensibilité des forêts à la chaleur, le réchauffement des conditions climatiques aura probablement un impact négatif disproportionné sur les taux de séquestration du carbone forestier dans les paysages urbains par rapport aux paysages ruraux.

Recommandations

La ville de Montréal aurait donc tout intérêt à mettre en place un programme d'entretien et de survie de ses arbres de rues afin de maximiser la séquestration du carbone de cette solution fondée sur la nature.

Une quantification de la séquestration du carbone potentiel et réel des arbres de rue devrait aussi être envisagée afin d'intégrer la compensation carbone des arbres dans son bilan carbone annuel.

2.2.3 Faisabilité du reboisement dans les zones urbaines afin de réduire la température

Bien que les solutions fondées sur la nature pour atténuer la chaleur urbaine aient pris de l'ampleur, il est important d'évaluer quantitativement la faisabilité de telles stratégies pour utiliser efficacement l'espace et donner la priorité aux communautés à faible revenu, qui ont moins d'options pour s'adapter au changement climatique.

La température plus élevée dans les villes par rapport aux zones environnantes, est généralement une conséquence du remplacement des surfaces naturelles par des zones bâties, est associée à une augmentation de la mortalité liées à la chaleur et à une demande d'énergie de refroidissement plus élevée à l'échelle urbaine⁵². Étant donné que la proportion d'humains résidant dans les villes et les températures urbaines devraient augmenter à l'avenir, les zones urbaines doivent être à l'avant-garde de l'adaptation au changement climatique et de son atténuation⁵³. Ces stratégies d'adaptation et d'atténuation doivent être déployées à l'échelle suburbaine car les zones urbaines présentent une grande hétérogénéité spatiale, avec un potentiel d'impacts liés à la chaleur disproportionnellement plus élevés sur les communautés vulnérables⁵⁴. Par exemple, aux États-Unis, la température de surface du sol urbain est généralement plus élevée dans les quartiers à faible revenu et est fortement associée aux disparités dans la couverture forestière urbaine⁵⁵. Ces populations vulnérables ont moins d'options pour faire face aux extrêmes de chaleur qui contribuent à plus de 5 millions de décès par an dans le monde⁵⁶. Parmi les nombreuses stratégies d'atténuation de la chaleur urbaine proposées, le boisement (défini comme la plantation d'arbres et la création de forêts là où elles étaient historiquement absentes) est une solution basée sur la nature avec de multiples cobénéfices et, si elle est mise en œuvre de manière stratégique, elle permettrait de séquestrer le carbone, de modérer la pollution de l'air, de réduire la demande énergétique, de modérer les impacts sur la santé pendant les mois chauds de l'été et de remédier à d'autres disparités environnementales⁵⁷.

Quelques études ont montré qu'à travers les États-Unis, les quartiers à faible revenu sont plus chauds et ont moins de couverture forestière que les quartiers à revenu élevé⁵⁸. Parallèlement, la végétalisation urbaine est de plus en plus étudiée et proposée comme une solution fondée sur la nature pour faire face aux impacts climatiques à l'échelle locale de l'urbanisation⁵⁹. Cependant, les villes disposent d'un espace limité pour les arbres de rue en raison du développement urbain, ce qui constitue un problème encore plus important pour les quartiers à forte densité qui abritent des populations plus pauvres. Il est donc essentiel d'examiner

⁵²A.J. McMichael, P. Wilkinson, R.S. Kovats, S. Pattenden, S. Hajat, B. Armstrong, N. Vajanapoom, E.M. Niciu, H. Mahomed, C. Kingkeow, others International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOTHURM' project International Journal of Epidemiology, 37 (2008), pp. 1121-1131

⁵³Cities must protect people from extreme heat Nature, 595 (2021), pp. 331-332,

⁵⁴T. Chakraborty, A. Hsu, D. Manya, G. Sheriff Disproportionately higher exposure to urban heat in lower-income neighborhoods: a multi-city perspective Environmental Research Letters, 14 (2019),

⁵⁵S.A. Benz, J.A. Burney Widespread race and class disparities in surface urban heat extremes across the United States Earths Future, 9 (2021)

⁵⁶L. Zhao, X. Lee, N.M. Schultz A wedge strategy for mitigation of urban warming in future climate scenarios Atmospheric Chemistry Physics, 17 (2017), pp. 9067-9080

⁵⁷H. Dorst, A. van der Jagt, R. Raven, H. Runhaar Urban greening through nature-based solutions – Key characteristics of an emerging concept Sustain. Cities Soc., 49 (2019), Article 101620,

⁵⁸S.A. Benz, S.J. Davis, J.A. Burney Drivers and projections of global surface temperature anomalies at the local scale Environmental Research Letters, 16 (2021),

⁵⁹C.D. Ziter, E.J. Pedersen, C.J. Kucharik, M.G. Turner Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer Proceedings of the National Academy of Sciences, 116 (2019),

systématiquement la faisabilité de la végétalisation urbaine dans les villes, à la fois pour limiter l'espace disponible pour la plantation d'arbres et pour se concentrer sur les quartiers les plus pauvres, car les populations vulnérables qui y vivent ont moins de ressources pour s'adapter aux facteurs de stress environnementaux comme la chaleur.

Chakraborty et al 2022⁶⁰ dans une étude sur les terres urbaines disponibles en Californie ont développé une approche utilisant la télédétection par satellite, les données sur la couverture forestière et les estimations du recensement pour étudier les disparités dans l'indice de température de surface du sol urbain et la couverture forestière afin de fournir un outil pour prioriser stratégiquement le reboisement urbain au sein d'une ville en comblant simultanément l'écart entre les arbres et en réduisant l'indice de température de surface du sol urbain. Cette approche a été réalisée pour la Californie, qui connaît une crise climatique avec de vastes vagues de chaleur pendant l'été, les communautés à faible revenu et vulnérables étant touchées de manière disproportionnée⁶¹.

À Los Angeles, par exemple, le quartile de revenu le plus bas a une couverture forestière inférieure de 9,5 % et une température de surface supérieure de 2,7 °C à celui du quartile de revenu le plus élevé, d'après leur analyse. Bien que la réduction de l'écart de couverture forestière urbaine ne puisse pas complètement remédier aux disparités en matière de température de surface du sol urbain, il y a néanmoins des avantages substantiels de la plantation d'arbres dans les villes.

Ces estimations générales de la réduction des effets sur la santé liés à la chaleur en raison du reboisement urbain sont censées être indicatives des avantages potentiels de l'atténuation de la chaleur urbaine pour soutenir davantage l'action climatique.

Les auteurs ont combiné des estimations dérivées de satellites avec des données de recensement pour calculer la surface potentielle disponible pour le reboisement urbain pour plus de 200 groupes urbains en Californie à l'échelle du groupe de blocs de recensement. Étant l'État le plus peuplé des États-Unis, le troisième le plus touché par les vagues de chaleur et la cinquième plus grande économie du monde, la Californie offre un excellent emplacement pour démontrer une approche visant à réduire stratégiquement les températures urbaines, à avoir un impact sur des millions de vies et à bénéficier spécifiquement aux populations vulnérables au risque de chaleur.

Les auteurs ont constaté que les quartiers pauvres de Californie ont 5,9 % de couverture arborée en moins et une intensité de l'indice de température de surface du sol urbain estivale de 1,7 °C supérieure à celle des quartiers riches. Cet écart dans la couverture forestière peut être partiellement réduit grâce à un reboisement urbain ciblé, qui, dans un scénario idéal, réduirait l'intensité moyenne de l'indice de température de surface du sol urbain en été de 1,8 °C.

La réduction de l'indice de température de surface du sol urbain est un avantage direct du reboisement urbain selon l'analyse statistique des auteurs et permet de remédier partiellement aux disparités d'exposition potentielle à la chaleur dans les villes. La couverture forestière urbaine présente cependant plusieurs autres avantages directs et indirects, allant de l'augmentation de la séquestration du carbone à la réduction du ruissellement des eaux pluviales en passant par la réduction de la mortalité et de la morbidité liées à la chaleur.

D'après les estimations de McPherson et al. 2017⁶², la séquestration annuelle nette de carbone par le biais du reboisement serait respectivement de 4,5, 0,8 et 2 millions de tonnes de CO₂, selon les scénarios étudiés en Californie. Cela correspond à des bénéfices annuels nets allant de 198 millions à 1,1 milliard de dollars. En outre, le reboisement dans les villes a ajouté des avantages à l'échelle locale aux espaces verts, notamment l'atténuation de la chaleur urbaine, la modération des concentrations de pollution atmosphérique et la réduction de la mortalité et de la morbidité liées à la chaleur⁶³.

⁶⁰ Chakraborty, T. et al. Feasibility of afforestation as an equitable nature-based solution in urban areas. *Sustain. Cities Soc.* 81, 103826 (2022).

⁶¹ S.B. Shonkoff, R. Morello-Frosch, M. Pastor, J. Sadd The climate gap: environmental health and equity implications of climate change and mitigation policies in California—a review of the literature *Climatic Change*, 109 (2011), pp. 485-503

⁶² E.G. McPherson, Q. Xiao, N.S. van Doorn, J. de Goede, J. Bjorkman, A. Hollander, R.M. Boynton, J.F. Quinn, J.H. Thorne The structure, function and value of urban forests in California communities *Urban Forest Urban Green*, 28 (2017), pp. 43-53

⁶³ J.E. Fargione, S. Bassett, T. Boucher, S.D. Bridgman, R.T. Conant, S.C. CookPatton, P.W. Ellis, A. Falcucci, J.W. Fourqurean, T. Gopalakrishna, others Natural climate solutions for the United States *Science Advances*, 4 (2018), p. eaat1869

La figure suivante résume les multiples cobénéfices qui ont été examinés au cours de l'étude de Chakraborty et al 2022 pour plusieurs sous-ensembles de villes.

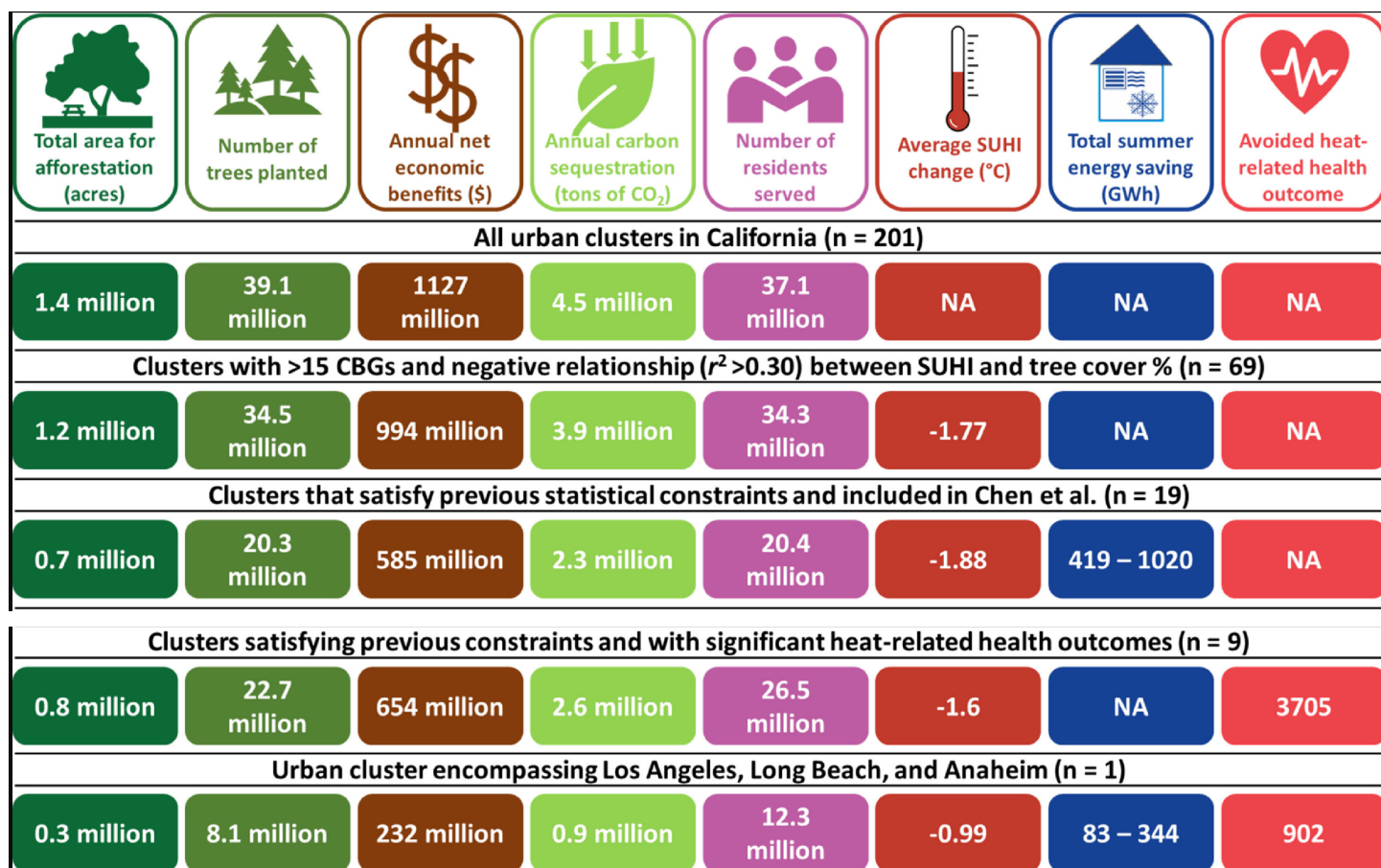


Fig. 8. Avantages et co-avantages résumés de différents scénario de reboisement, y compris la superficie totale plantable dans les villes, le nombre d'arbres pouvant être plantés et la population totale desservie, ainsi que ses avantages et co-avantages, notamment la séquestration du carbone, les avantages économiques nets, la réduction de l'intensité de l'indice de température de surface du sol urbain en été pendant la journée, les économies d'énergie en été et les résultats sanitaires évités liés à la chaleur. Les résumés sont présentés pour différents sous-ensembles de villes avec différents niveaux d'informations auxiliaires disponibles pour calculer les co-avantages.

En résumé

L'analyse de Chakraborty et al 2022 montrent que le reboisement urbain en Californie, contribuerait à l'adaptation au climat grâce à l'atténuation de la chaleur urbaine et aux avantages associés à l'échelle locale.

Cette étude indique aussi qu'il serait aussi possible de planter 36 millions d'arbres supplémentaires dans les zones urbaines de l'État et cela répartie sur 28 million d'acres. Cela réduirait la température moyenne de la surface terrestre urbaine de 1,8 °C et fournirait de multiples cobénéfices totalisant 1,1 milliard de dollars par an et 4,5 millions de tonnes métriques de séquestration annuelle de CO₂.

Recommandations

Montréal aurait tout intérêt à implanter son programme de reboisement en se concentrant en priorité sur les secteurs les plus désavantagés afin de diminuer le taux de mortalité et de morbidité des populations les plus vulnérables.

Montréal devrait aussi élaborer une programme beaucoup plus ambitieux de plantation d'arbres que celui actuellement prévu qui se limitent à 500 000 arbres d'ici 2030.

Enfin Montréal aurait aussi tout intérêt à quantifier la séquestration du carbone potentiel et réel associée à la plantation de nouveau arbres et d'effectuer un suivi de la survie des arbres urbains afin d'intégrer le tout dans son bilan carbone annuel.

2.2.4 Mise en œuvre simultanément de plusieurs solutions fondées sur la nature

Les villes peuvent aussi mettre en œuvre simultanément plusieurs phytotechnologies ou solutions fondées sur la nature (SFN) pour maximiser leurs avantages en matière de climat et de bien-être. En effet, ces dernières années, le concept de solutions fondées sur la nature (SFN) ou phytotechnologies est devenu de plus en plus populaire pour désigner des actions qui tirent parti de la nature pour relever les défis urbains de manière durable⁶⁴. La recherche et les applications innovantes des SFN sont soutenues par de nombreuses initiatives politiques, notamment dans l'Union européenne⁶⁵. La justification de la mise en œuvre de ces solutions nature - comme alternative ou en combinaison avec des mesures « grises » plus traditionnelles - est qu'elles offrent un large éventail d'avantages connexes tout en générant des impacts négatifs limités, s'avérant ainsi rentables dans une perspective à moyen et long terme.

Les SFN peuvent notamment contribuer à adapter les villes au changement climatique, l'un des principaux défis auxquels les zones urbaines seront confrontées dans les décennies à venir. Les villes européennes subissent déjà les effets du réchauffement climatique et, dans un avenir proche, elles devront faire face à une fréquence et à une intensité croissantes de chaleur extrême et de fortes pluies, souvent associées à d'autres risques climatiques tels que l'élévation du niveau de la mer, la sécheresse et les incendies. Relever ce défi nécessite une combinaison de stratégies ciblant plusieurs secteurs, de l'énergie et des transports à l'aménagement du territoire et à la santé.

Comme le montrent des collections récemment compilées telles que l'« Atlas de la nature urbaine⁶⁶ » et le « Compendium des SFN en Méditerranée⁶⁷ », de nombreux projets exemplaires ont déjà démontré le potentiel des SFN à petite et moyenne échelle pour favoriser l'adaptation au changement climatique. Les SFN telles que les toits végétalisés et les jardins de pluie peuvent augmenter la rétention et l'infiltration de l'eau et réduire le ruissellement des eaux pluviales, contribuant ainsi à prévenir les inondations urbaines dues à des pluies de plus en plus intenses. Les SFN peuvent également contribuer à réduire la température de l'air grâce à l'ombrage et à l'évapotranspiration, limitant ainsi les impacts négatifs des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses. La plupart du temps, ces avantages s'accompagnent d'avantages supplémentaires en termes de loisirs, de valeur esthétique, de qualité de l'air, voire de cohésion sociale et d'opportunités économiques, pour n'en citer que quelques-uns⁶⁸.

Le défi consiste désormais à passer des projets de démonstration à un déploiement à grande échelle des solutions fondées sur la nature⁶⁹. Cela nécessite d'agir sur des facteurs externes tels que les cadres réglementaires, les normes, les modèles commerciaux et financiers et l'acceptation sociétale de ces solutions⁷⁰. Un facteur critique est la disponibilité de l'espace pour mettre en œuvre les SFN, par exemple pour planter des arbres. Si les nouveaux projets de développement peuvent plus facilement intégrer les SFN dès leur réalisation, les possibilités d'intervention dans les zones bâties existantes sont limitées par la forme urbaine et les utilisations du sol préexistantes. Cela est particulièrement vrai dans les quartiers à forte densité, qui sont en même temps les plus vulnérables aux impacts du changement climatique.

Dans une étude récente, Cortinovis et al. 2022⁷¹ ont sélectionné trois études de cas : Barcelone (Espagne), Malmö (Suède) et Utrecht (Pays-Bas), et développé six scénarios qui simulent la situation actuelle et la mise en œuvre à grande échelle de différentes stratégies de SFN (c'est-à-dire l'installation de toits verts, la perméabilité des aires

⁶⁴ Babí Almenar, J., T. Elliot, B. Rugani, B. Philippe, T. Navarrete Gutierrez, G. Sonnemmann, D. Geneletti Nexus between nature-based solutions, ecosystem services and urban challenges Land Use Policy, 100 (2021), Article 104898,

⁶⁵ N. Faivre, M. Fritz, T. Freitas, B. de Boissezon, S. Vandewoestijne Nature-Based Solutions in the EU: innovating with nature to address social, economic and environmental challenges Environ. Res., 159 (2017), pp. 509-518,

⁶⁶ Almassy, D., L. Pinter, S. Rocha, S. Naumann, M. Davis, K. Abhold, H. Bulkeley Urban Nature Atlas: a Database of Nature-based Solutions across 100 European Cities (2018)

⁶⁷ A., M.V. Balzan, J. Tomaskinova, L. De Santis, M. Collier, J. Williams, L. Dicks, M. Grace, D. Geneletti, I. Demirova ReNature: creating the first nature-based solutions compendium in the Mediterranean Res. Ideas Outcomes, 6 (2020),

⁶⁸ C.M. Raymond, N. Frantzeskaki, N. Kabisch, P. Berry, M. Breil, M.R. Nita, D. Geneletti, C. Calfapietra A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas Environ. Sci. Policy, 77 (2017), pp. 15-24,

⁶⁹ Nature-based Solutions Coalition The Nature-Based Solutions for Climate Manifesto. Developed for the UN Climate Action Summit 2019 (2019)

⁷⁰ Frantzeskaki, N., T. McPhearson, M.J. Collier, D. Kendal, H. Bulkeley, A. Dumitru, C. Walsh, K. Noble, E. van Wyk, C. Ordóñez, C. Oke, L. Pinter Nature-based solutions for urban climate change adaptation: linking science, policy, and practice communities for evidence-based decision-making Bioscience, 69 (2019), pp. 455-466

⁷¹ Cortinovis, Chiara, Peter Olsson, Niklas Boke-Olén, Katarina Hedlund, Scaling up nature-based solutions for climate-change adaptation: Potential and benefits in three European cities, Urban Forestry & Urban Greening, Volume 67, 2022,

de stationnement, l'amélioration de la végétation dans les parcs urbains et la plantation d'arbres de rue), et une combinaison de ces dernières.

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer les bénéfices attendus et les cobénéfices d'une mise en œuvre à grande échelle de plusieurs SFN pour l'adaptation au changement climatique dans trois villes européennes.

Un scénario représente la situation actuelle, quatre scénarios se concentrent sur la mise en œuvre à grande échelle d'une seule SFN (installation de toits verts, augmentation de la perméabilité des aires de stationnement, amélioration de la végétation dans les parcs urbains et plantation d'arbres de rue), et un dernier scénario simule la mise en œuvre combinée des quatre stratégies.

Tableau 2.1. Scénarios de mise en œuvre de SFN simulées dans l'étude.

Scénario	Stratégie	Règles de transition de l'occupation du sol
Ligne de base	–	couverture terrestre actuelle
Toits verts	installation de toits verts	des toits verts extensifs sont installés sur tous les toits dont la taille est supérieure à 40 m ² et dont l'angle est inférieur à 20 degrés
Aires de stationnement	dépavage des aires de stationnement	les aires de stationnement existantes sont désobstruées et transformées en pelouses renforcées de béton ; les arbres présents sur les zones sont maintenus
Parcs	améliorer la végétation dans les parcs urbains	une partie des zones actuellement scellées (à l'exclusion des sentiers, des terrains de sport, des jardins familiaux et des cimetières) sont converties en végétation basse ; la couverture arborée est augmentée en ajoutant un arbre tous les 100 m ² de surface plantable
Arbres de rue	planter des arbres de rue	des arbres sont plantés le long des rues secondaires et des routes résidentielles, chaque fois que suffisamment d'espace est disponible (sans interférence avec la circulation)
Rêve Vert	tout ce qui précède	une combinaison de tout ce qui précède

Tout comme Montréal, les trois villes souffrent toutes de phénomènes météorologiques extrêmes qui devraient devenir plus fréquents en raison du changement climatique. Des vagues de chaleur estivales, avec des températures parfois supérieures à 30 °C, se produisent dans les trois villes, avec des conséquences négatives sur le bien-être des citoyens et la santé publique. De plus, les trois villes ont déjà connu des inondations urbaines causées par des pluies intenses.

Les résultats agrégés par ville au tableau 2.2 donnent un aperçu des bénéfices et des cobénéfices de la mise en œuvre de SFN dans les différents scénarios. Sans surprise, le scénario Rêve vert, qui combine plusieurs interventions SFN, est toujours le plus performant. Au contraire, le deuxième meilleur scénario varie en fonction des bénéfices ou des cobénéfices et, parfois, de la ville. Parmi les scénarios envisageant un seul type de SFN, le scénario *Parcs* surclasse les autres en améliorant l'atténuation de la chaleur dans les trois villes, tandis que le scénario *Toits verts* offre les meilleures performances en termes de réduction du ruissellement et de potentiel de biodiversité.

Tableau 2.2 Aperçu des bénéfices et des cobénéfices des six scénarios de mise en œuvre des solutions fondées sur la nature dans les trois villes étudiées (valeurs moyennes de l'indicateur dans la ville et écart type).

Ville	Scénario	Bénéfices et cobénéfices du SFN – valeurs moyennes et écart type				
		Atténuation de la chaleur (-)	Réduction du ruissellement (%)	Stockage de carbone (tonne/ha)	Potentiel de biodiversité (-)	Verdure globale (-)
Barcelone	Ligne de base	0,309 (± 0,257)	50,18 (± 33,71)	87 (± 107,8)	0,36 (± 0,33)	35,48 (± 28,81)
	Toits verts	0,309 (± 0,257)	55,67 (± 33,47)	93 (± 104,6)	0,55 (± 0,35)	35,48 (± 28,81)
	Aires de stationnement	0,309 (± 0,257)	50,39 (± 33,65)	87 (± 107,8)	0,36 (± 0,33)	35,46 (± 28,81)
	Parcs	0,319 (± 0,260)	51,24 (± 34,07)	91 (± 108,3)	0,38 (± 0,35)	36,98 (± 28,54)
	Arbres de rue	0,314 (± 0,254)	50,76 (± 33,90)	90 (± 107,7)	0,37 (± 0,33)	36,29 (± 28,54)
	Rêve Vert	0,324 (± 0,257)	57,49 (± 33,61)	98 (± 105,9)	0,59 (± 0,36)	37,72 (± 28,26)
Malmö	Ligne de base	0,185 (± 0,131)	58,34 (± 29,24)	67 (± 99,9)	0,60 (± 0,36)	60,91 (± 27,57)
	Toits verts	0,186 (± 0,131)	61,18 (± 28,62)	70 (± 98,7)	0,72 (± 0,36)	60,91 (± 27,57)
	Aires de stationnement	0,185 (± 0,131)	58,71 (± 29,06)	67 (± 99,8)	0,61 (± 0,36)	60,88 (± 27,58)
	Parcs	0,198 (± 0,150)	59,23 (± 29,34)	70 (± 104,9)	0,62 (± 0,38)	62,11 (± 27,04)
	Arbres de rue	0,196 (± 0,130)	59,32 (± 29,34)	70 (± 103,6)	0,65 (± 0,35)	62,26 (± 26,33)
	Rêve Vert	0,210 (± 0,146)	63,37 (± 28,37)	77 (± 107,6)	0,80 (± 0,36)	63,40 (± 25,84)
Utrecht	Ligne de base	0,247 (± 0,144)	58,53 (± 32,14)	113 (± 131,2)	0,63 (± 0,38)	61,02 (± 23,69)
	Toits verts	0,249 (± 0,143)	62,02 (± 31,42)	116 (± 129,1)	0,79 (± 0,38)	61,02 (± 23,69)
	Aires de stationnement	0,247 (± 0,144)	58,91 (± 31,95)	113 (± 131,2)	0,63 (± 0,38)	60,88 (± 23,72)
	Parcs	0,259 (± 0,157)	59,06 (± 32,20)	117 (± 134,8)	0,64 (± 0,39)	61,74 (± 23,60)
	Arbres de rue	0,255 (± 0,140)	59,31 (± 32,22)	116 (± 133,1)	0,66 (± 0,37)	62,10 (± 22,90)
	Rêve Vert	0,269 (± 0,151)	63,70 (± 31,16)	124 (± 135,1)	0,85 (± 0,37)	62,65 (± 22,82)

Dans les trois villes, la classe d'occupation du sol des zones industrielles et commerciales est celle qui contribue le plus aux scénarios toits verts et aires de stationnement. Même si cette classe d'occupation du sol ne couvre qu'environ 20 % des zones urbanisées, plus de la moitié des surfaces pouvant être converties en toitures végétalisées et en zones de stationnement perméables s'y trouvent. Les autres classes d'occupation du sol ayant un potentiel significatif pour intégrer des toitures végétalisées sont les zones résidentielles.

Dans cette étude, une comparaison avec les politiques existantes démontre que les scénarios peuvent être considérés comme extrêmes, mais pas irréalisables. Par exemple, les près de 53 000 nouveaux arbres de rue simulés à Malmö sont comparables aux 220 000 arbres de rue inclus dans l'initiative MillionTrees à New York⁷². Le scénario aires de stationnement qui aboutit au dépaillage de près de 4 % des surfaces actuellement étanches à Utrecht est bien en deçà de l'objectif de réduction de 10 % des surfaces imperméables récemment fixé par la ville néerlandaise d'Arnhem⁷³. La part des toits convertis en toits verts et la surface de toits verts par habitant qui en résulte sont, pour toutes les villes, bien plus élevées que celles enregistrées jusqu'à présent dans la littérature mais en accord avec ce qui se discute à Utrecht où, sous la devise « aucun toit inutilisé », la ville veut convertir

⁷² Lin, J., Q.Wang Are street tree inequalities growing or diminishing over time? The inequity remediation potential of the MillionTreesNYC initiativeJ. Environ. Manage., 285 (2021),

⁷³ The Guardian Dutch City Redraws Its Layout to Prepare for Global Heating Effects 2020

chaque toit soit en vert, soit en panneaux solaires⁷⁴. Sur la base de ces comparaisons, les scénarios sont considérés comme des simulations crédibles des effets potentiels des stratégies visant à étendre les SFN.

Globalement, les résultats de l'évaluation révèlent que la plupart des SFN apportent de multiples bénéfices. L'installation de toits verts a le plus grand potentiel pour réduire le ruissellement et augmenter la biodiversité, tandis que la plantation de plus d'arbres – soit le long des rues, soit dans les parcs urbains existants – produit le plus grand impact sur l'atténuation de la chaleur et la verdure. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions précédentes indiquant le rôle potentiel des toits verts dans la fourniture de multiples services écosystémiques, en particulier dans les contextes urbains denses⁷⁵ et soulignant l'importance de l'ombrage comme principal élément de l'atténuation de la chaleur d'où le rôle clé des arbres dans le contrôle du microclimat urbain⁷⁶.

En ce qui concerne le potentiel de mise à l'échelle des différents types de SFN, le scénario *Toits Verts* est celui qui concerne la plus grande partie de la zone urbaine dans toutes les études de cas. Dans toutes les études de cas, la surface convertie en toitures végétalisées est deux fois supérieure à la surface de la nouvelle couverture arborée ajoutée dans les parcs existants et au moins trois fois supérieure à la surface couverte par les nouveaux arbres de rue.

En se concentrant uniquement sur les avantages qui dépendent linéairement de la surface, les arbres de rue sont plus efficaces que les toits verts pour réduire le ruissellement, et pour améliorer le stockage du carbone. La plantation d'arbres apparaît comme la meilleure stratégie unique pour offrir de multiples avantages.

Cependant les toits verts ont un grand potentiel pour réduire le ruissellement et augmenter la biodiversité dans les contextes urbains denses. Les résultats soulignent l'importance de planter plus d'arbres, à la fois le long des rues et dans les espaces verts publics, comme stratégie efficace pour offrir un plus large éventail d'avantages de manière équilibrée et distribuée. L'analyse par classe d'utilisation des terres a également montré le grand potentiel d'adaptation au changement climatique des zones industrielles et commerciales, où de nombreuses personnes passent une grande partie de leur vie quotidienne.

En résumé

L'installation de toits verts, l'amélioration de la végétation dans les parcs urbains et la plantation d'arbres dans trois grandes villes européennes ont le potentiel d'augmenter le stockage de carbone de plusieurs tonnes de carbone supplémentaire par hectare, avec des stratégies optimales en fonction de la forme urbaine et de l'utilisation existante des sols.

Dans les trois villes, un déploiement à grande échelle de toits verts présente le plus grand potentiel pour réduire le ruissellement et augmenter la biodiversité, tandis que la plantation d'arbres – soit le long des rues, soit dans les parcs urbains – produit le plus grand impact sur l'atténuation de la chaleur et la verdure. Cependant, ces résultats impliquent des interventions de différentes tailles et dans différents endroits. La plantation d'arbres de rue maximise les interventions dans les zones résidentielles, mais les principales opportunités d'intégration de la plupart des types de solutions fondées sur la nature se situent également dans les zones commerciales et industrielles.

Recommandations

Les toits verts représentent une opportunité majeure pour Montréal en raison de l'espace urbain restreint notamment pour réduire le ruissellement. La mise en place d'une réglementation forçant l'installation de toits verts sur toutes les nouvelles constructions commerciales et industrielles seraient fortement à considérer.

Par ailleurs les arbres de rue constituent aussi une excellente solution fondée sur la nature pour l'atténuation de la chaleur et pour la verdure. Par conséquent la ville Montréal devrait entreprendre un vaste chantier de plantation d'arbre au-delà des 500 000 prévues à l'horizon 2030.

⁷⁴ The Guardian Utrecht Rooftops to Be 'greened' With Plants and Mosses in New Plan(2020)

⁷⁵ J. Langemeyer, D. Wedgwood, T. McPhearson, F. Baró, A.L. Madsen, D.N. Barton Creating urban green infrastructure where it is needed – a spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in BarcelonaSci. Total Environ., 707 (2020)

⁷⁶ D.E. Pataki, M. Alberti, M.L. Cadenasso, A.J. Felson, M.J. McDonnell, S. Pincetl, R.V. Pouyat, H. Setälä, T.H. Whitlow The benefits and limits of urban tree planting for environmental and human health Front. Ecol. Evol., 9 (2021)

2.2.5 Verdissement des parkings dans la province du Cap-Oriental, en Afrique du Sud

Une caractéristique commune des zones urbaines est la forte densité des réseaux routiers pour accueillir les transports privés et publics. Malgré les améliorations constantes de l'offre et de l'efficacité des transports publics, le nombre de véhicules sur les routes augmente chaque année. La prolifération des véhicules, concentrée dans les zones urbaines, pose un certain nombre de défis économiques, sociaux et écologiques aux urbanistes.

Ces défis ne concernent pas seulement le réseau routier, mais également les zones où les voitures sont garées pendant les heures de bureau ou à proximité des lieux de consommation tels que les équipements publics (terrains de sport, écoles, hôpitaux) et les centres commerciaux. Ainsi, à mesure que les villes s'étendent et que de plus en plus de voitures circulent sur les routes, les urbanistes sont chargés de fournir des zones de stationnement suffisantes. Aux États-Unis, ces zones représentent environ 10 % de la zone urbaine totale, et les quartiers d'affaires peuvent avoir jusqu'à 20 à 30 % de la surface consacrée aux parkings⁷⁷. Cette allocation aux zones de stationnement est souvent supérieure à la surface attribuée aux espaces verts urbains⁷⁸.

Traditionnellement, les parkings étaient considérés comme de simples zones où l'on pouvait laisser les voitures pendant que le propriétaire était ailleurs. Pourtant, avec la planification environnementale croissante dans les villes, la nécessité de s'attaquer à la conception environnementale et à la multifonctionnalité des zones de stationnement est pressante.

Les parkings sont généralement considérés comme des zones esthétiquement peu attrayantes dans le paysage urbain. Cependant, avec une planification et un aménagement paysager appropriés, les parcs de stationnement peuvent offrir une gamme d'avantages aux propriétaires de véhicules et à la société urbaine dans son ensemble. À cet égard, les arbres offrent aux zones urbaines un large éventail d'avantages et de services environnementaux. Les arbres séquestrent le carbone, augmentent la biodiversité urbaine, améliorent la qualité de l'air, économisent l'énergie dans les bâtiments environnants, amortissent le bruit, ajoutent à l'attrait esthétique du paysage, ont de multiples effets psychologiques positifs et diminuent la pression sur les infrastructures urbaines grâce à la rétention des eaux pluviales tout en augmentant la durée de vie de l'asphalte⁷⁹.

Ces avantages des arbres dans les paysages urbains s'appliquent également aux zones de stationnement. Les arbres dans les parkings brisent l'étendue du bitume et abaissent la température de l'air, ce qui en fait un environnement plus agréable pour se garer. En moyenne, les sites urbains avec des arbres sont de deux à quatre degrés plus frais que ceux qui n'en ont pas⁸⁰. Les véhicules sont non seulement une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre lorsqu'ils sont en marche, mais ils émettent également des gaz à effet de serre lorsqu'ils sont stationnés. Les réservoirs de carburant, les tuyaux usés contribuent jusqu'à 16 % des émissions de gaz organiques réactifs des voitures⁸¹. Ces émissions augmentent lorsque les températures sont plus élevées. Par conséquent, les effets rafraîchissants des arbres dans les parkings peuvent aider à réduire ces émissions.

Les arbres dans les parkings peuvent également attirer les consommateurs vers des zones commerciales spécifiques plutôt que vers des zones sans arbres. Les résultats d'une étude ont montré que les consommateurs sont nettement plus disposés à payer pour des places de stationnement arborées et passent plus de temps dans les centres commerciaux dont les parkings sont arborés que dans ceux qui n'en ont pas. Cela se traduit vraisemblablement par une augmentation du chiffre d'affaires des commerces situés à proximité de ces parkings, ce qui étend les avantages de la présence d'arbres dans un parking au-delà des avantages écologiques mentionnés ci-dessus⁸².

⁷⁷ Wolf K.L. Trees, parking and green law: strategies for sustainability, urban and community forestry – policy and law. Human Dimensions of the Urban Forest, Fact Sheet 15 University of Washington, Seattle (2004)

⁷⁸ A.Y. Davis, B.C. Pijanowski, K. Robinson, B. Engel The environmental and economic costs of sprawling parking lots in the United States Land Use Policy, 27 (2010), pp. 255-261

⁷⁹ C. Wu, Q. Xiao, E.G. McPherson A method for locating potential tree-planting sites in urban areas: a case study of Los Angeles, USA Urban Forestry and Urban Greening, 7 (2008), pp. 65-76

⁸⁰ A. Onishi, X. Caob, C. Itoc, F. Shia, H. Imura Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots Urban Forestry and Urban Greening, 9 (2010), pp. 323-333

⁸¹ K.I. Scott, J.R. Simpson, E.G. McPherson Effects of tree cover on parking lot microclimate and vehicle emissions Journal of Arboriculture, 25 (1999),

⁸² K.L. Wolf Strip malls, city trees, and community values Arboriculture and Urban Forestry, 35 (2009), pp. 33-40

Avec une proportion importante d'espace urbain occupé par des parkings, la foresterie urbaine dans ces zones peut créer des opportunités potentielles de vente de crédits carbone⁸³. Le marché des crédits carbone identifie cinq formes de projets forestiers, à savoir la reforestation, le boisement, la gestion forestière améliorée, la déforestation évitée et la foresterie urbaine⁸⁴. La production de crédits carbone à partir de parcs de stationnement paysagers n'a pas encore été entreprise, car le potentiel de production de crédits carbone à partir d'un seul parc de stationnement paysager est très limité. Cependant, à l'échelle d'une ville ou d'une région, le potentiel de production de crédits carbone par les parcs de stationnement serait bien plus important.

Dans une étude dans la province de Cap-Oriental en Afrique du Sud, O'Donoghue et Shackleton 2013⁸⁵ ont évalué l'ampleur actuelle de la plantation d'arbres dans les parkings des zones commerciales de villes et villages sud-africains de différentes tailles, en mettant l'accent sur le potentiel de séquestration du carbone en surface.

La densité des arbres par parking variait de zéro (2 parkings) à 66 arbres/hectare, avec une moyenne de $27,1 \pm 22,6$ arbres/ha. La majorité (80 %) des arbres ont été plantés dans des structures en bordure de trottoir avec une petite zone non pavée (< 1 m de largeur) autour de la base de l'arbre. La bordure empêchait tout ruissellement d'être canalisé vers la base de l'arbre. Dix-huit pour cent ont été plantés dans des massifs, 1 % avaient des grilles à la base et le 1 % restant était pavé jusqu'à la base de l'arbre.

La séquestration annuelle moyenne de carbone par unité de surface de stationnement était de $1,4 \pm 25$ t/C/ha/an. La majorité des stationnements (22 sur 28) séquestraient < 2 t/ha par an. Un petit stationnement était dominé par plusieurs très grands pins, ce qui a donné lieu aux taux de séquestration le plus élevé soit environ 12,8 t/C/ha/an.

La combinaison de la faible superficie des parcs de stationnement et de la faible densité d'arbres dans les parcs de stationnement a entraîné un taux de séquestration du carbone relativement faible et donc un potentiel de crédits carbone minime. Si des densités de plantation de 66 arbres/ha étaient atteintes dans l'ensemble des parcs de stationnement de toutes les zones urbaines de la province, les taux de séquestration pourraient être augmentés à environ 539 t C/an.

Malgré tout, les auteurs ont conclu que si la production de crédits carbone étaient envisagés, les parcs de stationnement ne devraient pas être considérés isolément des autres espaces et initiatives de plantation d'arbres urbains. Ils devraient être intégrés dans des programmes plus vastes de plantation d'arbres urbains, tels que des arbres de rue dans toute la ville⁸⁶ pour générer des volumes suffisants pour être éligibles à un quelconque système de crédit carbone.

À l'échelle micro, l'étude a révélé que peu de mesures avaient été prises pour optimiser la croissance potentielle des arbres dans les parkings, et donc la séquestration du carbone ou d'autres avantages. La plupart des arbres échantillonnés n'avaient pas de lits de sol ouverts, ou s'ils en avaient, seule une petite zone de sol était laissée à la base des arbres. La plupart des arbres ont été plantés en rangées délimitées par des bordures continues. De telles conditions de plantation limitent l'aération du sol et des racines et détournent le ruissellement des arbres plutôt que vers eux.

Les arbres, dans la mesure du possible, devraient être plantés en massifs continus ou en îlots, plutôt qu'individuellement⁸⁷. Les plates-bandes doivent avoir au moins un mètre de large autour de chaque arbre et le sol doit être mélangé avec du gravier afin de ventiler le sol, d'augmenter l'infiltration et de diminuer le compactage⁸⁸. Les racines des arbres pourraient être guidées vers le bas grâce à l'utilisation de barrières racinaires respectueuses des arbres et le sol de surface doit être paillé pour conserver l'humidité et réduire l'érosion éolienne et hydrique. Les surfaces des parkings doivent être conçues de manière que le ruissellement soit canalisé vers les massifs plutôt que vers les égouts pluviaux. Si des bordures sont utilisées, il faut privilégier les

⁸³ M.R. McHale, E.G. McPherson, I.C. Burke The potential of urban tree plantings to be costs effective in carbon credit markets *Urban Forestry and Urban Greening*, 6 (2007), pp. 49-60

⁸⁴ N.C. Poudyal, J.P. Sirya, J.M. Bowkerb Quality of urban forest carbon credits *Urban Forestry and Urban Greening*, 10 (2011), pp. 223-230

⁸⁵ Alexandra O'Donoghue, Charlie M. Shackleton, Current and potential carbon stocks of trees in urban parking lots in towns of the Eastern Cape, South Africa, *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 12, Issue 4, 2013, Pages 443-449,

⁸⁶ Stoffberg, G.H., M.W. van Rooyen, M.J. van der Linde, H.T. Groeneveld Carbon sequestration estimates of indigenous street trees in the City of Tshwane, South Africa *Urban Forestry and Urban Greening*, 9 (2010), pp. 9-14

⁸⁷ Wolf, K.L. Social aspects of urban forestry: public response to the urban forest in inner-city business districts *Journal of Arboriculture*, 29 (2003), 117-126

⁸⁸ Appleton, B., Horsley, V. Harris, G. Eaton, L. Fox, J. Orband, C. Hoysa Trees for parking lots and paved areas *Trees for Problem Landscape Sites* Publication (2002), pp. 430-528

bordures poreuses ou laisser des espaces entre les bordures imperméables afin que l'eau puisse s'écouler dans le massif de l'arbre⁹¹.

Si les gestionnaires veulent optimiser le potentiel des parcs de stationnement en tant que puits de carbone dans le paysage urbain, la densité des arbres doit être élevée. La ville de Montréal devrait envisager des réglementations ou des programmes d'incitation pour encourager la plantation de densités d'arbres plus élevées dans les parcs de stationnement de son territoire. Par exemple, les politiques de Sacramento, Davis et Los Angeles sont telles que dans les 15 ans suivant l'obtention d'un permis de développement, 50 % de la totalité des parcs de stationnement doivent être ombragés⁸⁹, avec des avantages de refroidissement concomitants pour ceux qui s'y garent.

En résumé

Le verdissement des parkings des centres commerciaux est une stratégie potentiellement importante qui peut contribuer aux efforts de réduction du carbone urbain, améliorer l'esthétique et l'expérience d'achat des consommateurs, tout en contribuant à la biodiversité urbaine.

En Afrique du Sud, 28 parking ont été échantillonnés pour déterminer la composition des espèces d'arbres, la densité et le potentiel annuel de séquestration du carbone. La densité d'arbres la plus élevée était de 66 arbres/ha, tandis que la densité moyenne sur tous les parkings échantillonnés était inférieure à la moitié de celle-ci (27 arbres/ha). Les parkings actuels éliminent environ 1,4 tCO₂ par hectare par an mais le tout pourrait être au moins doublé si la densité était similaire à celle d'un des stationnement qui comportait 66 arbres/hectare. La faible densité des arbres et les petites superficies des parkings ont limité le potentiel d'obtention de crédits carbone à partir des arbres des parkings.

Recommandations

Mettre en place une réglementation obligeant à densifier le nombre d'arbres planté dans les stationnements existants et ceux des futurs développements.

Évaluer la possibilité de contribuer au marché des crédits carbone de compensation avec un programme de plantation d'arbres à plus grande échelle intégrant aussi les arbres de rues.

2.2.6 Potentiel de stockage du carbone grâce à la conversion des pelouses en paysages arborés

Dans une métaanalyse de 65 études, Gillman et al. 2023⁹⁰ ont examiné le potentiel de stockage du carbone dans l'herbe tondue par rapport à celui fourni par d'autres types de végétation. Le texte suivant est un résumé de cette métaanalyse.

À l'échelle mondiale, l'herbe tondue est l'une des caractéristiques les plus courantes de nos paysages façonnés par l'homme ; elle est presque omniprésente dans les jardins résidentiels de banlieue, en particulier aux États-Unis, en Australie et en Nouvelle-Zélande⁹¹. On estime que l'herbe tondue couvre 16,4 millions d'hectare dans les 48 États contigus des États-Unis seulement, une superficie qui équivaut à peu près à celle de l'Angleterre et de la Belgique réunies.

À l'échelle mondiale, elle occupe 15 à 80 millions d'hectare de terres en zones urbaines. La pelouse impériale est née de l'herbe coupée à la main au lieu des pâturages broutés pour démontrer la richesse de la noblesse. Aujourd'hui, une grande variété de pelouses sont constituées d'herbe tondue. Si certaines d'entre elles peuvent avoir un but spécifique (par exemple pour les terrains de sport et de loisirs), leur apparition est souvent purement historique car les terres qui n'ont pas d'usage spécifique désigné sont souvent tondues simplement pour les garder propres et, dans de nombreux cas, il n'y a aucune raison de les conserver comme herbe tondue.

⁸⁹ McPherson, E.G., J.R. Simpson, K.I. Scott Actualizing microclimate and air quality benefits with parking lot tree shade ordinances Wetter and Leben, 50 (2000), pp. 353-369

⁹⁰ Gillman LN, Bollard B, Leuzinger S. Calling time on the imperial lawn and the imperative for greenhouse gas mitigation. *Global Sustainability*. 2023;6:e3

⁹¹ Ignatieva, M. E., & Stewart, G. H. (2009). Homogeneity of urban biotopes and similarity of landscape design language in former colonial cities.

In McDonnell, M. J., Hahs, A. K., & Breuste, J. H. (Eds.), *Ecology of cities and towns: A comparative approach* (pp. 399–421). Cambridge University Press.

L'herbe tondue a été promue comme fournissant des services écosystémiques importants tels que la séquestration du carbone, et bien qu'elle puisse présenter des avantages par rapport aux surfaces imperméables, la comparaison est nettement désavantageuse par rapport aux avantages des arbres et des arbustes qui auraient autrefois occupé les pelouses actuelles. Étant donné la nature répandue de l'herbe tondue et l'humanité confrontée à une crise climatique catastrophique, il est important d'examiner le rôle que jouent les pelouses en ce qui concerne les gaz à effet de serre.

2.2.6.1. Stockage et émissions de carbone dans les pelouses

La séquestration annuelle brute de carbone dans les sols de pelouse, cumulée sur deux décennies, peut atteindre 28 t/ha (tableau 2.1). Cependant, bien que la séquestration du carbone dans les sols de pelouse puisse se produire sur plusieurs années, on peut s'attendre à une saturation rapide et qu'elle se rapproche de zéro dans les 30 à 50 ans, selon le climat⁹². En revanche, les émissions de gaz à effet de serre liées à la tonte, à la fertilisation et à l'irrigation sont sommatives et s'étendent aux périodes passées de séquestration biologique du carbone dans les sols. Par conséquent, elles doivent être soustraites de la séquestration brute pour établir les flux et les réserves d'équivalent carbone net.

Tableau 2.1. Un échantillon de publications rapportant l'équivalent carbone émis en raison de l'entretien et du carbone organique stocké ou séquestré dans le sol. Toutes les unités sont exprimées en tonnes équivalent carbone/hectare .

Description	20-year emissions due to fertiliser use	20-year emissions due to fuel use for maintenance	20-year emissions due to irrigation	20-year gross organic carbon sequestration in soil	Net 20-year organic carbon sequestration in soil	Reported stored organic carbon in soil	Location	References
Mown lawns, low fertiliser rate (0–20 cm depth)	4.9	6.7	10.6	28.2	5.9		California	(Townsend-Small & Czimczik, 2010a, 2010b)
Mown lawns, high fertiliser rate (0–20 cm depth)	26.6	6.7	10.6	28.2	–15.6			
Mown lawns	1.3	3.8				45.8	USA Average	(Selhorst & Lal, 2013)
Residential lawns (0–50 cm depth)				3.0			Alabama	(Huyler et al., 2014a)
Weekly mown lawns		3.4					Massachusetts	(Lerman & Contosta, 2019)
Three-weekly mown lawns		1.4						
Residential lawn maintenance		2.8					Florida	(Horn et al., 2015)
Residential tree maintenance		0.04						
Grass (high fertiliser rate)	13.4							(Gu et al., 2015)
Grass, push mower		4.29					Singapore	(Velasco et al., 2021)
Parkland shrubs (0–60 cm depth)						91.5	Helsinki	(Lindén et al., 2020)
Parkland lawn (0–60 cm depth)						73.0		
Mixed forest soil (0–1 m depth)						101.9	Seoul	(Bae & Ryu, 2015)
Lawn (0–1 m depth)						37.4		
Urban forest (0–30 cm)						89	Auckland	(Weissert et al., 2016)
Lawn (0–30 cm) 3/4 sites irrigated and fertilised						108		
Lawn (0–40 cm) (100 years old) fertilised					5.96	29.8	Salt Lake City	(Smith et al., 2018)
Forest restoration 7–8 years old (0–100 cm)						37.9–82.9	New York City	(Downey et al., 2021)
Park lawn C (14yrs old) (0–15 cm)	126*					31.5	Shenzen and Hong Kong	(Kong et al., 2014)
Lawn (high sand content) (0–10 cm)				4.2		11.5	Texas	(Sapkota et al., 2020)
Dry urban forest (0–30 cm)						75.7	Hamburg	(Dorendorf et al., 2015)
Wet urban forest (0–30 cm)						144.3		

2.2.6.2 Émissions associées à la tonte et à la fertilisation.

Le taux d'émissions de carbone dû à la tonte dépend de la taille et du type de tondeuse utilisée ainsi que de la régularité de la tonte. Les estimations varient de 1,4 à 6,7 t C/ha sur deux décennies. Étant donné que la superficie

⁹² Lindén, L., Riikonen, A., Setälä, H., & Yli-Pelkonen, V. (2020). Quantifying carbon stocks in urban parks under cold climate conditions. Urban Forestry & Urban Greening, 49, 126633

estimée de gazon tondu aux États-Unis continentaux est de 16,4 millions d'hectares⁹³, cela implique qu'aux États-Unis seulement, 1,1 à 5,5 millions de tonnes de carbone sont émises chaque année en raison de la tonte.

L'ajout d'engrais aux pelouses provoque des émissions de N₂O qui ont un effet de forçage climatique 298 fois supérieur à celui du CO₂. Les émissions provenant de la fertilisation dépendent de la régularité et du taux d'application, mais avec les taux élevés souvent recommandés, ils peuvent émettre jusqu'à 26,6 tonnes d'équivalent carbone/ha, sur deux décennies soit une quantité presque égale aux taux de séquestration les plus élevés signalés (tableau 2.1).

Ainsi, l'herbe tondue et fertilisée peut produire des émissions sur deux décennies équivalant à 43,9 tonnes d'équivalent carbone par hectare. Certaines estimations des émissions dues à l'entretien des pelouses vont jusqu'à 126 tonnes d'équivalent carbone par hectare sur deux décennies (tableau 2.1)

Ces taux d'émission dépassent de loin la séquestration brute la plus élevée dans le sol, soit 28 tonnes, au cours de la même période. Les émissions de gaz à effet de serre liées à l'entretien même de base des pelouses (c'est-à-dire la tonte peu fréquente sans engrais ni irrigation) finiront par dépasser le potentiel de stockage de carbone, transformant les pelouses de puits de carbone en sources de carbone⁹⁴. Étant donné que de nombreux aménagements paysagers sont anciens et existent depuis plusieurs décennies, on peut supposer que la plupart d'entre eux agissent déjà comme des sources de carbone. Enfin, le carbone stocké au-dessus du sol dans l'herbe tondue est en moyenne de 1,0 t/ha et de 1,4t ha sous terre⁹⁵. Ce chiffre est négligeable par rapport au potentiel de carbone stocké dans les tissus végétaux des arbres et des arbustes.

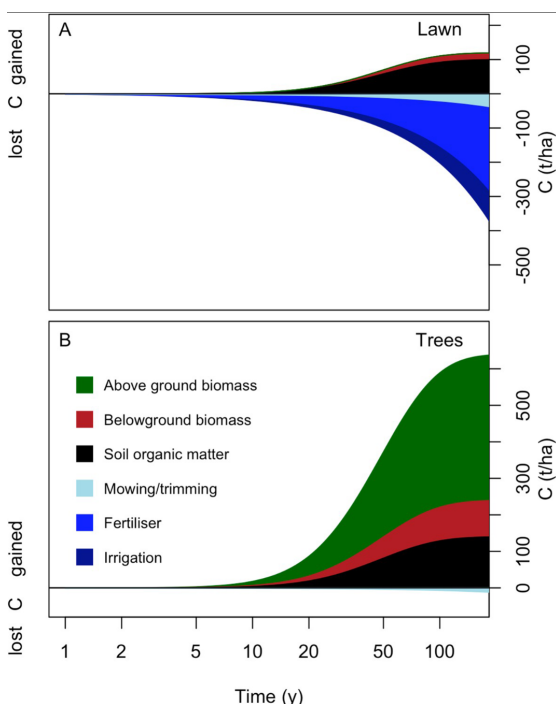


Fig. 2.1. Séquestration et émissions cumulées de carbone au fil du temps (échelle logarithmique) pour les pelouses et les paysages arborés, en supposant que la teneur en carbone au départ soit nulle, tant au-dessus qu'au-dessous du sol, la première année. Notez que les gains de carbone se stabilisent après environ 50 ans pour l'herbe et après environ 100 ans pour les arbres. À l'inverse, les pertes de carbone associées à la tonte, à la fertilisation, à l'irrigation et à la taille sont constantes et dépassent rapidement les gains potentiels de carbone dans les sols herbeux. Le « point de compensation du carbone » (où les émissions sont égales à la séquestration) se produit dès quelques années dans les pelouses, mais peut ne jamais se produire dans les forêts ou les paysages arborés. Si les arbres plus anciens sont supprimés et utilisés soit pour remplacer les combustibles fossiles, soit comme bois de construction, alors le bilan carbone semble encore plus en faveur des arbres.

⁹³ Milesi, C., Running, S. W., Elvidge, C. D., Dietz, J. B., Tuttle, B. T., & Nemani, R. R. (2005). Mapping and modeling the biogeochemical cycling of turf grasses in the United States. *Environmental Management*, 36(3), 426–438.

⁹⁴ Selhorst, A., & Lal, R. (2013). Net carbon sequestration potential and emissions in home lawn turfgrasses of the United States. *Environmental Management*, 51(1), 198–208.

⁹⁵ Guertal, E. A. (2012). Carbon sequestration in turfed landscapes: A review. In Lal, R., & Augustin, B. (Eds.), *Carbon sequestration in urban ecosystems* (pp. 197–213). Dordrecht, Netherland

2.2.6.3 Potentiel de stockage du carbone grâce à la conversion des pelouses en paysages arborés

Le carbone stocké dans les tissus végétaux des forêts naturelles varie considérablement, mais peut, par exemple, atteindre 690 t/ha au Ghana tropical et 360 t/ha dans les climats tempérés froids comme la Nouvelle-Zélande (tableau 2.2). Même la végétation arbustive basse peut stocker des quantités de carbone nettement supérieures à celles des pelouses. Par exemple, les broussailles de sauge indigènes de Californie contiennent 43 t/ha de carbone aérien et souterrain. Bien que ces forêts naturelles vierges et ces zones arbustives denses ne puissent pas être comparées directement au potentiel de stockage de carbone des paysages arborés urbains, certains signalent des réserves de carbone presque aussi élevées dans les parcs : jusqu'à 420 t/ha de carbone aérien dans le Ghana tropical (475 t C ha⁻¹ racines incluses) et jusqu'à 289 t/ha de carbone aérien dans le climat tempéré frais de Leicester, en Angleterre. Les arbres résidentiels en Floride stockeraient 63 t de carbone aérien par hectare, et à Leipzig, en Allemagne, le carbone aérien stocké par hectare de couverture arborée dans les zones avec des maisons à plusieurs étages peut atteindre 64 tonnes (tableau 2.2).

Les taux de séquestration du carbone au-dessus et au-dessous du sol signalés sont en moyenne de 61,2 t/ha sur deux décennies dans les zones urbaines des États-Unis, mais sur la même période, la séquestration du carbone au-dessus du sol à elle seule atteint 137 t/ha dans la forêt urbaine de Séoul. Les arbustes peuvent séquestrer jusqu'à 62 t/ha sur deux décennies⁹⁶. Cependant, la séquestration ne peut pas se poursuivre indéfiniment et se rapproche de zéro lorsque les taux de respiration correspondent aux taux de photosynthèse. Dans un contexte urbain, le sort de la biomasse extraite sera important. Si le bois issu des arbres abattus ou élagués est utilisé pour fabriquer des meubles ou pour produire du biochar, le bilan carbone peut rester positif.

En plus du stockage de carbone beaucoup plus élevé dans les tissus végétaux au-dessus et au-dessous du sol dans les paysages arborés par rapport aux paysages gazonnés, le potentiel de stockage du carbone organique souterrain doit être pris en compte. Les sols sous les forêts naturelles stockent plus de carbone organique que ceux sous les prairies naturelles dans les mêmes zones climatiques⁹⁷. La teneur en carbone du sol sous les arbres urbains peut atteindre 144 t ha⁻¹ sans ajout d'engrais ou d'irrigation tableau 2.2. De plus, le carbone organique du sol sous l'herbe tondue augmente avec l'ajout d'arbres ou d'arbustes dans une relation linéaire avec la biomasse des arbres au-dessus du sol.

Tableau 2.2 Un échantillon de publications faisant état du carbone stocké et séquestré dans la végétation urbaine : tonnes de carbone par hectare de couverture végétale et par hectare de terre

Description	20-year carbon sequestration per hectare of cover	Stored carbon per hectare of cover	Stored carbon per hectare of land	Location	References
Natural forest (AG)			19.8	Barcelona	(Chaparro & Terradas, 2009)
Natural forest (AG and BG)			690.4	Kumasi	(Nero et al., 2017)
Natural forest (AG and BG plus litter)			144-360.5	Auckland	(Paul et al., 2021)
Public owned sites (AG)			288.6	Leicester	(Davies et al., 2011)
Urban trees (AG and BG)	61.2			Average across 50 states	(Nowak et al., 2013)
Urban Forest (AG)	136.8		63.19	Seoul	(Lee et al., 2019)
Natural urban forest AG and BG to 10 cm depth		263.04		New York	(Pregitzer et al., 2021)
Urban dry forest (AG and BG)			123.2	Hamburg	(Dorendorf et al., 2015)
Forest park (AG and BG)			262.4	Almada	(Mexia et al., 2018)
Park trees (AG and BG)			474.7	Kumasi	(Nero et al., 2017)
Domestic garden trees		28.6		Leipzig	(Strohbach & Haase, 2012)
Domestic garden trees (multi-story houses)		63.8			
Residential trees			63.0	Florida	(Timilsina, et al., 2014)
Mixed shrub species (AG)	62.2			New Zealand	(Kimberley et al., 2014)
Sage scrub (AG and BG to 10 cm depth)		43		California	(Wheeler et al., 2016)
Grass (AG)		1.0		Average reported from 2012 literature review	(Guertal, 2012)
Grass (BG)		1.4			

AG, tiges aériennes ; BG, racines souterraines.

⁹⁶ Kimberley, M., Bergin, D., & Beets, P. (2014). Technical article No. 10; carbon sequestration by planted native tree shrubs. In: Tane's Tree Trust

⁹⁷ Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 10(2), 423–436

Les émissions des arbres dues à la taille et à d'autres travaux d'entretien doivent être considérées comme des composantes permanentes de leur bilan carbone. Une étude réalisée en Floride a révélé des émissions de carbone dues à l'entretien des arbres de 0,04 t/ha projetées sur deux décennies, soit un taux d'émission de gaz à effet de serre lié à l'entretien d'environ deux ordres de grandeur inférieur à celui des pelouses⁹⁸.

En résumé, la couverture forestière, quelle que soit sa forme, présente un potentiel de séquestration et de stockage du carbone bien plus important, à la fois au-dessus et au-dessous du sol. Les effets à moyen et long terme du remplacement des pelouses par des paysages arborés sont illustrés à la figure, le principal avantage des arbres étant la capacité de stockage bien plus élevée au-dessus du sol, combinée à la nature sommative des émissions liées à l'entretien des pelouses. Si les arbres urbains qui meurent ou doivent être abattus pour d'autres raisons sont utilisés pour le bois d'œuvre ou pour remplacer les combustibles fossiles, le bilan carbone sera plus favorable que celui illustré à la figure 2.1

2.2.6.4. Les avantages des paysages arborés

Les pelouses ont été promues comme fournissant des services écosystémiques, notamment la séquestration du carbone⁹⁹. En revanche, dans les biorégions capables de supporter des arbres, l'herbe tondue représente un écosystème dégradé en termes de carbone par rapport aux terres forestières qui occupaient autrefois ces sites. La littérature démontre clairement que les paysages arborés non seulement stockent considérablement plus de carbone par unité de surface que l'herbe tondue, mais qu'ils restent des puits de carbone pendant des périodes beaucoup plus longues. Plus importantes encore que les réservoirs de carbone et les taux de séquestration plus importants offerts par les paysages arborés sont les émissions inévitables et constantes dues aux pelouses, principalement causées par la tonte, la fertilisation et l'irrigation. Avec l'omniprésence des prairies fauchées, il existe une opportunité de créer des paysages alternatifs qui non seulement stockent plus de carbone au-dessus du sol, mais ont également un potentiel de stockage souterrain plus important. Bien que le rôle des arbres urbains dans la fourniture de services écosystémiques, en particulier la séquestration du carbone, ait été démontré dans de nombreuses villes du monde, peu de travaux ont été réalisés pour mettre en œuvre ces connaissances dans les politiques d'aménagement du territoire¹⁰⁰.

La plantation d'arbres en milieu urbain, en plus de fixer le carbone, peut, comme mentionné dans ce mémoire, réduire la pollution, rafraîchir les températures de l'air en été et ainsi réduire la mortalité liée au stress thermique, atténuer le ruissellement des eaux pluviales, et si des espèces indigènes de la région sont utilisées, elles favorisent la restauration écologique. Les pelouses contribuent à l'homogénéité du paysage et manquent généralement de biodiversité, en particulier si la tonte est fréquente⁹⁷.

Les pelouses sont devenues un élément tellement commun de nos environnements de vie qu'il est difficile pour certaines personnes d'imaginer des alternatives. En général, les gens ne remettent pas en question leurs valeurs sociales ou esthétiques, et encore moins leurs conséquences écologiques¹⁵⁴. Les auteurs ne suggèrent pas que toutes les pelouses soient converties en paysages arborés, mais l'impératif de lutter contre le changement climatique est d'une telle importance qu'ils pensent qu'il faut fournir un effort pour convertir autant que possible, et il se peut que l'acceptation d'un tel changement soit plus grande que ne l'imaginent les gestionnaires fonciers. Une étude menée à Varsovie a révélé qu'une nette majorité des visiteurs du parc pensaient que la conversion des pelouses en plantations d'arbres augmenterait l'attrait des intérieurs des parcs¹⁰¹.

Pour maximiser la séquestration du carbone atmosphérique, Montréal devrait : premièrement, quantifier la superficie des prairies tondues et identifier le potentiel de séquestration du carbone par conversion en paysages

⁹⁸ Horn, J., Escobedo, F. J., Hinkle, R., Hostetler, M., & Timilsina, N. (2015). The role of composition, invasives, and maintenance emissions on urban forest carbon stocks. *Environmental Management*, 55(2), 431–442

⁹⁹ Velasco, E., Segovia, E., Choong, A. M. F., Lim, B. K. Y., & Vargas, R. (2021). Carbon dioxide dynamics in a residential lawn of a tropical city. *Journal of Environmental Management*, 280, 111752.

¹⁰⁰ Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., GomezBaggethun, E., Gren, Å., Hamstead, Z., Hansen, R., Kabisch, N., Kr emer, P., Langemeyer, J., Rall, E.L., McPhearson, T., Pauleit, S., Qureshi, S., Schwarz, N., Voigt, A., ... Elmqvist, T. (2014). A quantitative review of urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. *AMBIO*, 43(4), 413–433.

¹⁰¹ Sikorska, D., Macegoniuk, S., Łaskiewicz, E., & Sikorski, P. (2020). Energy crops in urban parks as a promising alternative to traditional lawns – perceptions and a cost-benefit analysis. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49,

arborés. Les améliorations de la qualité des données issues des images satellite et des algorithmes de classification améliorés permettent désormais une cartographie précise de la couverture des prairies tondues¹⁰².

Deuxièmement, des politiques et des plans spécifiques pour maximiser cette conversion devraient être mis en place. Les auteurs proposent quatre types d'espaces urbains et non urbains qui, avant l'occupation humaine, auraient soutenu la forêt mais sont maintenant dégradés en pelouses : les parcs publics et les réserves récréatives, les accotements d'autoroute, les talus de rues résidentielles et les jardins privés. La pertinence et l'adéquation de ces types d'espaces pour la conversion en paysages arborés varieront selon le pays ou même la région en question.

2.2.6.5 Parcs publics et réserves récréatives

Les auteurs proposent une réévaluation généralisée des plans de gestion des parcs en vue d'identifier les zones à retirer de la tonte. Cela nécessitera un changement fondamental dans ce que les gens perçoivent comme souhaitable et utilisable dans les parcs. Cependant, la crise climatique est d'une telle ampleur que toutes les options possibles doivent être explorées et des mesures prises pour réduire les émissions et augmenter la séquestration du carbone partout où cela est possible. Les approches de plantation devront tenir compte de la quantité de trafic public que reçoivent les zones. Il y a donc une gamme d'options de plantation, dont un mélange pourrait être introduit dans un parc donné. Ces options vont d'une structure forestière entièrement étagée (canopée et arbres émergents avec arbustes sous-étage et végétation au sol comme les fougères, les arbustes ligneux, les graminées et/ou les herbes selon l'emplacement), à des paysages d'arbres ouverts avec des canopées principalement fermées mais avec un sous-étage ouvert et des espaces pour fournir des espaces aux personnes pour se rassembler pour des pique-niques et d'autres activités, à des paysages d'arbres de faible densité avec des espèces d'herbes indigènes qui nécessitent peu ou pas de tonte figure 2.2. Les arbustes peuvent être utilisés lorsqu'une vue dégagée est nécessaire.

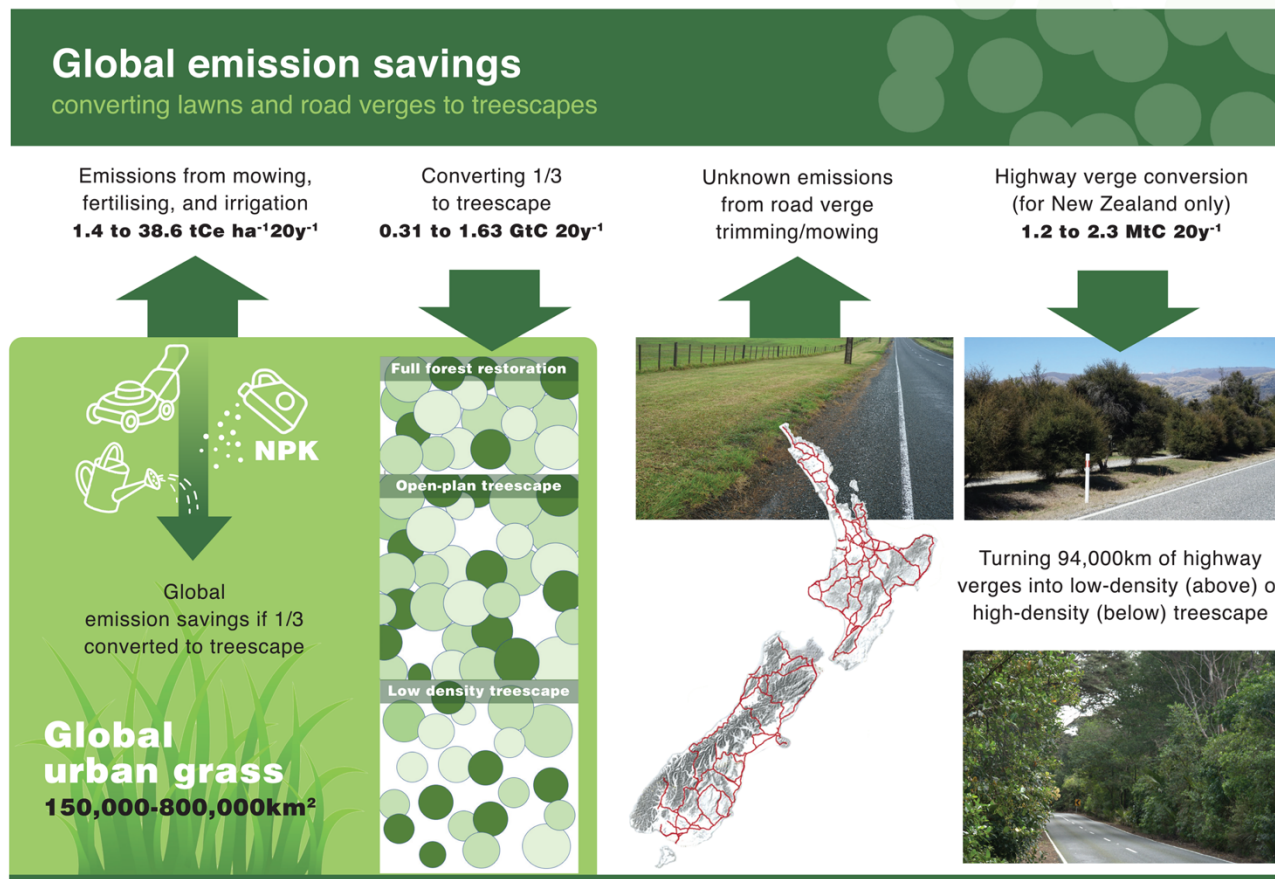


Fig. 2.2 À gauche : impact potentiel sur le cycle global du carbone si un tiers des pelouses urbaines sont converties en paysages arborés à l'échelle mondiale. Le calcul du modèle est basé sur une moyenne de trois régimes de plantation différents : restauration d'un écosystème

¹⁰² Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. Remote Sensing of Environment, 117, 34–49.

forestier complet, paysages arborés ouverts avec des trouées de lumière et paysages arborés à faible densité. À droite, un calcul du modèle pour les accotements d'autoroutes néo-zélandais est présenté, en supposant un réseau autoroutier de 94 000 km (sans compter les routes secondaires), un accotement de 1 à 2 m et un mélange de plantations à faible et à haute densité. Sur deux décennies, cette conversion entraînerait un stockage de carbone de 1,2 à 2,3 Mt C 20/an.

2.2.6.6 Bords de route et jardins privés

Les bordures des autoroutes sont régulièrement débarrassées de la végétation et entretenues sous forme de gazon tondu, car on estime que cela rend les routes plus sûres. D'un côté, les arbres situés à proximité des bordures des routes créent des risques d'accident pour les conducteurs qui perdent le contrôle, mais, d'un autre côté, ils réduisent le stress des conducteurs, abaissent la vitesse de conduite et réduisent ainsi la fréquence et la gravité des accidents¹⁰³. Il y a donc lieu de considérer la conversion des accotements coupés en bordure de route en arbustes et arbres qui peuvent contribuer à la séquestration du carbone et éliminer le besoin de tonte (figure 2.1). En Nouvelle-Zélande, par exemple, avec une population d'environ 5 millions d'habitants, il y a 94 000 km d'autoroutes. En supposant 1 à 2 m d'herbe tondu de chaque côté de la route, on estime une superficie totale de 18 800 à 37 600 ha de bordures d'autoroutes coupées. Les arbustes indigènes de Nouvelle-Zélande peuvent stocker jusqu'à 62,2 t/ha de carbone aérien après deux décennies de croissance, fournissant ainsi potentiellement 1,2 à 2,3 Mt de stockage de carbone aérien sur deux décennies (figure 2.2)¹⁰⁴. La plantation d'arbres pourrait permettre de stocker davantage de ressources sur des périodes plus longues. De même, les pelouses devant et derrière les maisons et les talus de gazon le long des rues sont courants dans de nombreux pays, en particulier ceux influencés par la colonisation. Certaines de ces zones offrent des espaces de jeu aux enfants ou permettent d'accéder à des infrastructures souterraines, mais beaucoup existent sans raison spécifique, c'est un paramètre par défaut rarement remis en question. Une grande partie de cette herbe pourrait être convertie en arbustes ou en arbres (figure 2).

En résumé

Les auteurs concluent que l'herbe tondu apporte dans presque tous les cas une contribution négative (libération de carbone) lorsque les émissions associées à l'entretien des pelouses sont prises en compte. D'autres formes de couverture végétale, telles que les arbustes et les arbres, stockent beaucoup plus de carbone, à la fois sous et au-dessus du sol. Les auteurs recommandent donc des changements radicaux dans les paramètres politiques pour maximiser la conversion de l'herbe tondu en arbustes, arbres ou végétation mixte.

Si un tiers des pelouses des zones urbaines pouvait être converti en couverture arborée, les auteurs estiment que 0,31 à 1,63 Gt de carbone pourraient être séquestrés sur deux décennies. L'estimation peut être ambitieuse, mais même un dixième de ces chiffres serait substantiel. Le taux de séquestration s'accroîtra dans les décennies suivantes, et la séquestration du carbone organique du sol ainsi que les économies d'émissions dues à l'entretien redondant des pelouses s'ajouteront à cette estimation. Enfin, les nombreux avantages connexes des arbres, notamment pour la santé humaine et la biodiversité, plaident fortement en faveur d'une reconsidération de l'utilisation des sols urbains.

La couverture forestière, quelle que soit sa forme, présente un potentiel de séquestration et de stockage du carbone bien plus important, à la fois au-dessus et au-dessous du sol. Le principal avantage des arbres étant la capacité de stockage bien plus élevée au-dessus du sol, combinée à la nature sommative des émissions liées à l'entretien des pelouses. Si les arbres urbains qui meurent ou doivent être abattus pour d'autres raisons sont utilisés pour le bois d'œuvre ou pour remplacer produire du biochar, le bilan carbone sera plus favorable.

Recommandations

Montréal devrait envisager d'introduire des politiques visant à réglementer ou à encourager la conversion des zones d'herbe tondu sans arbres en zones arbustives et/ou en paysages arborés, en éliminant l'herbe tondu autant que possible et, lorsque les circonstances l'exigent, en conservant les arbres avec un minimum d'herbe.

Les gains en séquestration du carbone devraient aussi être quantifiés et intégrés au bilan carbone annuel.

¹⁰³ Van Treese Ii, J. W., Koeser, A. K., Fitzpatrick, G. E., Olexa, M. T., & Allen, E. J. (2017). A review of the impact of roadway vegetation on drivers' health and well-being and the risks associated with single-vehicle crashes. *Arboricultural Journal*, 39(3), 179–193.

¹⁰⁴ Kimberley, M., Bergin, D., & Beets, P. (2014). Technical article No. 10; carbon sequestration by planted native tree shrubs. In: Tane's Tree Trust

2.2.6 Potentiel mondial de compensation des émissions de carbone urbaines grâce à la reforestation

Les solutions fondées sur la nature (SFN), sont des actions qui exploitent les écosystèmes naturels et modifiés pour relever les défis socio-environnementaux. Elles deviennent de plus en plus pertinentes et importantes pour les efforts de durabilité environnementale. Parmi la vaste gamme d'objectifs que les SFN peuvent avoir, celles qui se concentrent sur l'atténuation du changement climatique par la séquestration du carbone ou la réduction des émissions sont communément appelées solutions climatiques naturelles (SCN). Ces SCN pourraient réduire de manière rentable les émissions jusqu'à un tiers de l'objectif $<2^{\circ}\text{C}$ de l'Accord de Paris sur le climat, tout en offrant une multitude d'avantages pour la fonction des écosystèmes, la biodiversité et les moyens de subsistance locaux¹⁰⁵. Cette contribution est de plus en plus reconnue, comme en témoigne la multiplication par trois des investissements dans les solutions climatiques naturelles depuis 2016¹⁰⁶.

Les zones urbaines sont constituées principalement de surfaces imperméables qui occupent moins de 1 à 3 % de la surface terrestre mondiale¹⁰⁷ et sont constamment confrontées à une multitude d'utilisations concurrentes des terres. Le potentiel des solutions climatiques naturelles est généralement perçu comme insignifiant et donc souvent négligé par les évaluations existantes du potentiel en SNC¹⁰⁸. Ainsi, les villes ont tendance à rechercher des SNC principalement pour les services écosystémiques locaux tels que la régulation des inondations, les avantages pour la santé et les valeurs culturelles¹⁰⁹ plutôt que pour leur capacité à contribuer à l'atténuation du changement climatique mondial.

Les villes ont une forte concentration de ressources humaines, financières et politiques, et ont donc de plus grandes capacités à mener à bien des projets qui nécessitent beaucoup de ressources ou l'adhésion de nombreuses parties prenantes¹¹⁰. En fait, une grande partie de l'intérêt croissant pour les solutions fondées sur la nature vient des centres urbains. La reconnaissance accrue des nombreux avantages des forêts urbaines tels que le refroidissement, la protection contre les inondations, la réduction de la pollution et la santé mentale a accompagné le lancement de programmes ambitieux de plantation d'arbres dans de nombreuses villes. Parmi les exemples notables, citons le programme 50 millions d'arbres de Pékin¹¹¹, ainsi que les projets Million Trees à New York¹¹², Los Angeles¹¹³ et Singapour¹¹⁴. Il existe cependant un manque de connaissances sur le potentiel et les limites des forêts urbaines à l'échelle mondiale pour séquestrer les émissions de gaz à effet de serre. Comprendre cela peut aider les villes à mettre en œuvre des solutions fondées sur la nature pour leurs bénéfices en matière d'atténuation du changement climatique.

Pour estimer les opportunités et les contraintes de la reforestation urbaine à l'échelle mondiale, Chen Teo et al. 2021¹¹⁵ ont identifié les zones vertes non boisées au sein des villes couvertes d'herbe ou d'arbustes, situées dans les biomes forestiers, boréaux et de savane. Ces zones ont été supposées biophysiquement adaptées à la reforestation. Ils ont ensuite estimé le potentiel d'atténuation du changement climatique de la reforestation dans ces zones vertes qui pourrait être attribué uniquement à la croissance de la biomasse aérienne et comparé ce potentiel aux émissions totales de carbone de chaque ville.

Selon leur analyse, à l'échelle mondiale, il existe un total de $10,9 \pm 2,8$ millions d'hectares ha d'espaces verts urbains dans 7595 villes qui sont potentiellement disponibles pour la reforestation (tableau1).

¹⁰⁵ Griscom B W et al 2017 Natural climate solutions *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 114 11645–50

¹⁰⁶ Donofrio S, Maguire P, Merry W and Zwick S 2019 *Financing Emissions Reductions for the Future* available at: www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2019/12/SOVCM2019.pdf

¹⁰⁷ Liu Z, He C, Zhou Y and Wu J 2014 How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion *Landsc. Ecol.* **29** 763–71

¹⁰⁸ Cook-Patton S C et al 2020 Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth *Nature* 585 545–50

¹⁰⁹ Song X P, Tan P Y, Edwards P and Richards D 2018 The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: a systematic review *Urban For. Urban Green.* **29** 162–70

¹¹⁰ Frantzeskaki N et al 2019 Nature-based solutions for urban climate change adaptation: linking science, policy, and practice communities for evidence-based decision-making *Bioscience* 69 455–66

¹¹¹ Yao N et al 2019 Beijing's 50 million new urban trees: strategic governance for large-scale urban afforestation *Urban For. Urban Green.* **44** 126392

¹¹² McPhearson P T et al 2010 Assessing the effects of the urban forest restoration effect of MillionTreesNYC on the structure and functioning of New York city ecosystems *Cities Environ.* **3** 7

¹¹³ McPhearson E G, Simpson J R, Xiao Q and Wu C 2011 Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment *Landsc. Urban Plan.* **99** 40–50

¹¹⁴ NParks Singapore 2020 One million trees movement available at: www.nparks.gov.sg/treesg/one-million-trees-movement

¹¹⁵ Chen Teo, Hoong, Yiwen Zeng, Tasya Vadya Sarira, Tze Kwan Fung², Qiming Zheng, Xiao Ping Son⁴, Kwek Yan Chong and Lian Pin Koh¹ 2021 Global urban reforestation can be an important natural climate solution. *Environ. Res. Lett.* **16** 034059

Tableau 1. Potentiel de reforestation urbaine par régions du monde et par classe de taille de ville en 2015.

		Villes			Forêt urbaine existante		Potentiel de reforestation			
Région		<i>n</i>	Superficie (Mha)	Émissions de 2015 MtCO₂e	Superficie (Mha)	%	Superficie (Mha)	%	Potentiel d'atténuation (MtCO ₂ e/an)	% compensé
Région	Nord global	1406	20.4	2410	3,24 ± 0,83	15,9	4,06 ± 1,04	19,9	18,33 ± 6,29	0,8
	Amérique du Nord	283	8.66	842	1,67 ± 0,43	19.3	1,49 ± 0,38	17.2	5,74 ± 2,00	0,7
	Europe de l'Ouest	472	4.86	542	0,86 ± 0,22	17.7	1,24 ± 0,32	25,5	6,78 ± 2,25	1.3
	Europe de l'Est	529	3.88	592	0,43 ± 0,11	11.2	0,84 ± 0,22	21,8	2,7 ± 1,06	0,5
	Océanie	28	0,758	59	0,05 ± 0,01	6.9	0,13 ± 0,03	16.7	0,67 ± 0,24	1.1
	Japon (Asie de l'Est)	94	2.20	375	0,23 ± 0,06	9.7	0,36 ± 0,09	16.2	2,17 ± 0,74	0,6
	Sud global	6189	41,5	4868	2,75 ± 0,71	6.7	6,82 ± 1,75	16.4	64,06 ± 19,36	1.3
	Asie de l'Est (sans le Japon)	1640	12.07	2945	0,80 ± 0,21	6.6	1,88 ± 0,48	15,5	12,23 ± 3,97	0,4
	Asie du Sud-Est	487	5,75	351	0,43 ± 0,11	7.5	0,64 ± 0,16	11.1	9,63 ± 2,70	2.7
	Asie du Sud	1701	8.15	509	0,64 ± 0,16	7.9	0,92 ± 0,24	11.2	6,62 ± 2,14	1.3
	Moyen-Orient	394	2.69	439	0,05 ± 0,01	1.9	0,22 ± 0,06	8.1	0,70 ± 0,27	0,2
	Afrique	1189	7.11	272	0,26 ± 0,07	3.7	1,87 ± 0,48	26.3	20,06 ± 5,95	7.4
	Amérique latine	778	5.73	351	0,58 ± 0,15	10.0	1,30 ± 0,33	22,7	14,82 ± 4,34	4.2
	Petit (50 à 200 000)	5023	11.9	555	1,09 ± 0,28	9.1	2,27 ± 0,58	19.0	16,63 ± 5,23	3.0
Classe de taille	Milieu (200k-1 m)	2123	18.1	1712	1,67 ± 0,43	9.2	3,22 ± 0,83	17.8	23,51 ± 7,37	1.4
	Grande (1–10 m)	419	22.4	2831	2,39 ± 0,61	10.7	4,12 ± 1,06	18.4	32,14 ± 9,93	1.1
	Méga (>10 m)	30	9.5	2178	0,86 ± 0,22	9.0	1,26 ± 0,32	13.2	10,12 ± 3,12	0,5
	Monde entier	7595	61,87	7277	6,01 ± 1,54	9.7	10,88 ± 2,80	17.6	82,40 ± 25,65	1.1

Cela représente 17,6 % de l'étendue de toutes les zones urbaines et équivaut à un potentiel d'atténuation du changement climatique de $82,4 \pm 25,7 \text{ MtCO}_2 \text{ eq/an}$ (soit 1,1 % du total des émissions de carbone des villes).

Bien que le potentiel d'atténuation du changement climatique du reboisement urbain ($82,4 \pm 25,7 \text{ MtCO}_2 \text{ e/an}$) soit bien inférieur à celui du reboisement conventionnel dans les zones rurales ($\sim 1600 \text{ MtCO}_2 \text{ eq/an}^{102}$), les résultats montrent qu'il peut contribuer substantiellement aux objectifs locaux de réduction ou d'atténuation du carbone¹¹⁶. Dans l'ensemble, l'étude constate que pour 1189 villes (6,6 % de toutes les villes), le reboisement des espaces verts dans leurs limites peut techniquement compenser plus de 25 % des émissions locales de carbone. Il s'agissait principalement de villes de petite taille ($n = 977$) et de taille moyenne ($n = 195$) avec des émissions totales de carbone plus faibles.

Pour les villes d'Amérique du Nord fortement urbanisées, le pourcentage de compensation des émissions locales de CO₂ sont beaucoup plus faible oscillent autour de 1% en raison des fortes concentrations de de CO₂ figure 2.1

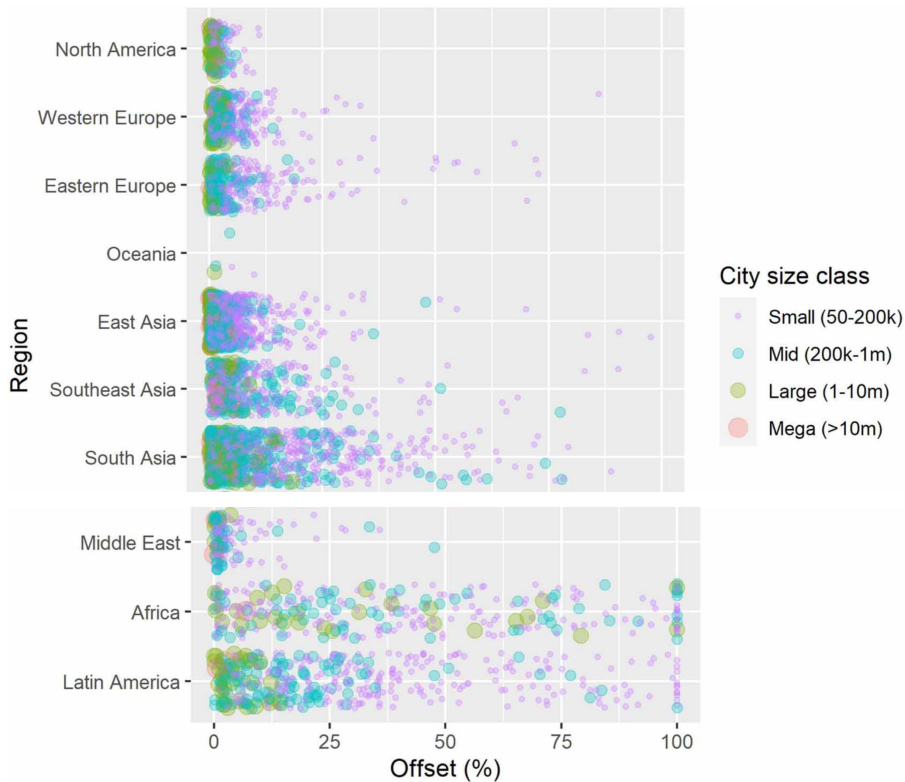


Figure 2.2 Pourcentage des émissions de carbone des villes pouvant être compensées par la reforestation urbaine pour chaque région du monde. Seules les zones biophysiquement reforestables ont été prises en compte.

Bien que les solutions climatiques naturelles aient suscité beaucoup d'attention à l'échelle mondiale, les chercheurs recommandent de plus en plus la prudence, car une grande partie de ce potentiel ne peut pas être exploitée en raison de contraintes biophysiques et socioéconomiques ou ne devrait pas l'être en raison de ses effets potentiellement néfastes sur les écosystèmes et les moyens de subsistance¹¹⁷. De nombreuses zones urbaines considérées comme reforestables pourraient être confrontées à des obstacles de la part des utilisateurs et des propriétaires fonciers ainsi qu'à des plans de développement futurs ; même les zones légalement protégées peuvent être confrontées à un risque élevé de déclassement en raison d'incitations financières écrasantes¹¹⁸.

En résumé

Le potentiel d'atténuation du changement climatique des solutions urbaines fondées sur la nature (SFN) est souvent perçu comme insignifiant et donc négligé, car les villes recherchent principalement des SFN pour les

¹¹⁶ Iyer G et al 2018 Implications of sustainable development considerations for comparability across nationally determined contributions *Nat. Clim. Change* 8 124–9

¹¹⁷ Cao S et al 2010 Damage caused to the environment by reforestation policies in arid and semi-arid areas of China *Ambio* 39 279–83

¹¹⁸ Golden Kroner R E et al 2019 The uncertain future of protected lands and waters *Science* 364 881–6

services écosystémiques locaux. Compte tenu de l'intérêt croissant et des capacités des villes pour de tels projets, le potentiel des forêts urbaines pour l'atténuation du changement climatique doit être mieux compris.

Dans cette étude, le potentiel de la reforestation urbaine à l'échelle mondiale a été modélisé. Selon les auteurs 10,9 ± 2,8 Mha de terres (17,6 % de toutes les zones urbaines) sont propices à la reforestation, ce qui compenserait 82,4 ± 25,7 MtCO₂/eq/an d'émissions de carbone. Parmi les villes analysées, 1189 sont potentiellement en mesure de compenser > 25 % de leurs émissions de carbone urbaines grâce à la reforestation. Les solutions climatiques naturelles urbaines devraient trouver une place dans les agendas mondiaux et locaux.

Recommandations

Comme mentionné auparavant Montréal aurait tout intérêt à introduire des politiques visant à réglementer ou à encourager la conversion des zones vertes non boisées.

Les gains en séquestration du carbone devraient aussi être quantifiés et intégrés au bilan carbone annuel.

3 Stockage du C dans les sols

3.1 Biochar et stockage du carbone dans les sols

Les sols urbains sont largement influencés par les activités anthropiques. La capacité de stockage du carbone des sols urbains a été largement reconnue, certaines études suggérant que le carbone stocké dans les espaces verts urbains est comparable¹¹⁹ ou même supérieur à celui des terres agricoles rurales et des habitats naturels¹²⁰.

Les sols sont donc reconnus non seulement pour leur potentiel de séquestration du carbone, mais aussi comme moyen de stockage lorsqu'ils sont associés à des amendements de biochar¹²¹. Le biochar est une matière carbonée issue du traitement thermochimique de la biomasse à haute température dans un environnement privé d'oxygène¹²². Son potentiel en tant que technologie d'émissions négatives provient de la stabilisation du carbone biogénique retiré de l'atmosphère par la matière organique à partir de laquelle le biochar est produit.

La grande résistance biologique et les taux de décomposition lents du biochar empêchent le CO₂ séquestré de retourner dans l'atmosphère, le piégeant pendant des milliers d'années¹²³. Au-delà de son potentiel de stockage de carbone, le biochar est utilisé comme amendement du sol en raison de ses grandes capacités de rétention d'eau et de nutriments¹²⁴, ainsi que de ses propriétés d'assainissement des sols en immobilisant les métaux toxiques et les contaminants organiques dans le sol et l'eau¹²⁵.

La végétation urbaine et les sols qui la soutiennent sont généralement exposés à des conditions de croissance difficiles. L'accès des plantes à l'air, à l'eau et aux nutriments est limité par la grande sensibilité des sols urbains à la déshydratation et au compactage, la mauvaise composition du sol, l'absence d'infiltration d'eau et l'espace racinaire restreint¹²⁶.

Les propriétés d'amendement du sol au biochar placent ce matériau riche en carbone comme un excellent candidat pour relever ces défis urbains et améliorer la productivité de la végétation dans les villes¹²⁷. Les avantages en matière de carbone obtenus grâce à l'ajout de biochar aux sols urbains vont au-delà du potentiel d'émissions négatives du biochar : l'amélioration de la productivité du sol et de la croissance des plantes stimule la photosynthèse, ce qui entraîne une augmentation des taux de séquestration dans la végétation.

¹¹⁹ Chien, S.-C. & Krums, J. A. Natural versus urban global soil organic carbon stocks: A meta analysis. *Sci. Total Environ.* 807, 150999 (2022)

¹²⁰ Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McHugh, N., Gaston, K. J. & Leake, J. R. Organic carbon hidden in urban ecosystems. *Sci. Rep.* 2, (2012).

¹²¹ 69. Schmidt, H.-P. et al. Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy* 13, 1708–1730 (2021).

¹²² 70. Rodrigues, S. & Horan, E. The Role of Biochar in Sustainable Agriculture, and Climate Change Mitigation for Sustainable Cities. in *Sustainable Development Research in the Asia-Pacific Region: Education, Cities, Infrastructure and Buildings* (eds. Leal Filho, W., Rogers, J. & Iyer-Raniga, U.) 437–447 (Springer International Publishing, 2018). doi:10.1007/978-3-319-73293-0_25.

¹²³ Smith, S. M. et al. The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition. 1–108 Available at: <https://www.stateofcdr.org> (2023).

¹²⁴ Yu, H. et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *J. Environ. Manage.* 232, 8–21 (2019).

¹²⁵ Bolan, N. et al. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *Int. Mater. Rev.* 67, 794 150–200 (2022).

¹²⁶ Cavender, N. & Donnelly, G. Intersecting urban forestry and botanical gardens to address big challenges for healthier trees, people, and cities. *PLANTS PEOPLE PLANET* 1, 315–322 (2019).

¹²⁷ Somerville, P. D., Farrell, C., May, P. B. & Livesley, S. J. Biochar and compost equally improve urban soil physical and biological properties and tree growth, with no added benefit in combination. *Sci. Total Environ.* 706, 135736 (2020).

Les recherches sur la séquestration du carbone par les arbres urbains excluent généralement le stockage du carbone dans les sols urbains. Seules quelques études sur la dynamique du carbone dans les sols urbains ont été publiées et les données sur le carbone dans les sols urbains sont rares¹²⁸. Cependant, le sol a un impact significatif sur la séquestration du carbone. Churkina et al. 2010¹²⁹ ont démontré que 64 % du stockage de carbone dans les établissements humains est attribué au sol, 20 % à la végétation, 11 % aux décharges et 5 % aux bâtiments. De plus, d'autres chercheurs ont souligné que les sols des parcs et des pelouses urbains peuvent stocker de grandes quantités de carbone, qui pourraient largement dépasser la quantité stockée dans les prairies indigènes, les champs agricoles et les forêts boréales¹³⁰. Pour atténuer efficacement le changement climatique, le carbone doit rester stocké bien plus longtemps que dans certains matériaux, comme le bois, par exemple. Le sol ayant une grande capacité et un potentiel de stockage du carbone, il faut en tenir compte dans la planification et la conception des espaces verts urbains.

C'est dans ce contexte que le stockage du carbone des sols urbains peut être encore augmenté en ajoutant du biochar dans le milieu de culture¹³¹. Le biochar est un résidu de carbone organique très stable produit lors de la pyrolyse de la biomasse, c'est-à-dire un processus de décomposition thermique de la matière organique en l'absence d'oxygène. Dans le sol, le biochar peut améliorer la capacité de rétention d'eau et la structure physique, absorber les nutriments et affecter positivement l'activité microbienne et la croissance mycorhizienne, ce qui présente des avantages pour la croissance des plantes¹³². Dans les sols urbains ou aménagés, les effets du biochar sur les processus du sol dépendent cependant des propriétés du biochar, du sol, du climat et de la faune du sol et les effets sur la croissance des plantes peuvent varier selon les conditions expérimentales et les espèces végétales¹³³. Le biochar représente un puits de carbone potentiellement précieux car il est très stable dans les environnements du sol¹³⁴. En raison de ses multiples avantages, l'utilisation du biochar gagne en popularité pour la gestion des sols urbains, en particulier pour les arbres urbains¹³⁵.

De leur côté, les forêts urbaines sont vulnérables aux graves menaces que représentent les changements anthropiques des régimes de température climatique et les régimes de précipitations plus sporadiques et imprévisibles¹³⁶. Dans le même temps, les arbres sont souvent plantés dans des sols urbains dégradés et compactés, ce qui peut compromettre les services écosystémiques fournis par les arbres, car cela réduit l'établissement et la croissance des arbres¹³⁷. L'établissement des arbres est souvent lent ou infructueux dans les sols urbains dégradés et compactés en raison de conditions physiques, chimiques et biologiques défavorables qui sont exacerbées par l'effet d'îlot de chaleur urbain¹³⁸. Alors que les sols urbains présentent une variabilité spatiale et temporelle importante, de nombreux sols urbains dégradés présentent des quantités réduites de matière organique et des niveaux de compaction élevés¹³⁹. C'est principalement ce type de sols pauvres en carbone et en matière organique que l'on retrouve dans les fosses à arbres à Montréal. Cela donne lieu à des sols à faible porosité et à forte imperméabilité, et par conséquent à une infiltration, un stockage et une disponibilité de l'eau réduits, entre autres problèmes de gestion des sols.

Les amendements contenant de la matière organique (MO) en décomposition rapide, comme le compost, peuvent améliorer la structure et la porosité du sol et, par conséquent, améliorer le mouvement de l'eau et du gaz

¹²⁸ K. Lorenz, R. Lal Managing soil carbon stocks to enhance the resilience of urban ecosystems *Carbon Manage.*, 6 (1–2) (2015), pp. 35-50

¹²⁹ G. Churkina, D.G. Brown, G. Keoleian Carbon stored in human settlements: the conterminous United States *Glob. Change Biol.*, 16 (1) (2010), pp. 135-143

¹³⁰ L. Lindén, A. Riikonen, H. Setälä, V. Yli-Pelkonen Quantifying carbon stocks in urban parks under cold climate conditions *Urban For. Urban Green.*, 49 (2020),

¹³¹ S. Ghosh, D. Yeo, B. Wilson, L. Ow. Application of char products improves urban soil quality *Soil Use Manage.*, 28 (2012), pp. 329-336

¹³² C.J. Atkinson, J.D. Fitzgerald, N.A. Hipps Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review *Plant Soil*, 337 (1) (2010), pp. 1-18

¹³³ X. Liu, A. Zhang, C. Ji, S. Joseph, R. Bian, L. Li, G. Pan, J. Paz-Ferreiro Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions - a meta-analysis of literature data *Plant Soil*, 373 (1–2) (2013), pp. 583-594

¹³⁴ E. Meschewski, N. Holm, B.K. Sharma, K. Spokas, N. Minalt, J.J. Kelly Pyrolysis biochar has negligible effects on soil greenhouse gas production, microbial communities, plant germination, and initial seedling growth *Chemosphere*, 228 (2019), pp. 565-576

¹³⁵ B. Scharenbroch, E. Meza, M. Catania, K. Fite Biochar and biosolids increase tree growth and improve soil quality for urban landscapes *J. Environ. Qual.*, 42 (2013), pp. 1372-1385

¹³⁶ C. Ordóñez, P.N. Duinker Assessing the vulnerability of urban forests to climate change *Environ. Rev.*, 22 (2014), pp. 311-321

¹³⁷ M.A. Pavao-Zuckerman The nature of urban soils and their role in ecological restoration in cities *Restor. Ecol.*, 16 (2008), pp. 642-649

¹³⁸ A.K. Koeser, E.F. Gilman, M. Paz, C. Harchick Factors influencing urban tree planting program growth and survival in Florida, United States *Urban For. Urban Green.*, 13 (2014), pp. 655-66

¹³⁹ B.C. Scharenbroch A meta-analysis of studies published in *Arboriculture & Urban Forestry* relating to organic materials and impacts on soil, tree, and environmental properties *J. Arboric.*, 35 (2009), p. 221

pour la croissance des racines et des arbres¹⁴⁰. L'utilisation de matière organique issue des flux de déchets urbains contribue à promouvoir l'utilisation durable des ressources dans une approche d'économie circulaire. La présence physique de matière organique seule peut également augmenter la quantité d'eau disponible pour les plantes que le sol peut fournir, indépendamment de toute amélioration de la structure et de la porosité du sol au fil du temps¹⁴¹. La texture du sol déterminera également l'effet des efforts d'amélioration des sols¹⁴². Par exemple, les sols sableux peuvent acquérir une meilleure capacité de rétention d'eau grâce à des amendements en matière organique et à une capacité accrue d'échange de cations¹⁴³.

L'utilisation d'autres formes plus stables de matière organique, comme le biochar, pour des améliorations à plus long terme des propriétés du sol est un domaine de recherche émergent¹⁴⁴. Le biochar a été étudié notamment dans le cadre d'amendements en agriculture et en foresterie¹⁴⁵⁻¹⁴⁶. Cependant, l'utilisation du biochar comme moyen d'améliorer l'établissement et la croissance des arbres dans les sols urbains dégradés et compactés a été moins bien étudiée¹⁴⁷. Le biochar peut fonctionner différemment de la matière organique à décomposition rapide lorsqu'il est utilisé comme amendement du sol, car la nature récalcitrante et la grande surface du biochar peuvent également apporter des avantages supplémentaires aux types de matière organique plus traditionnels, tels que le compost¹⁴⁸.

3.1.1 Biochar et stockage du carbone dans les cours résidentielles d'Helsinki

L'étude de cas suivante menée à Helsinki, en Finlande et réalisée par Ariluoma et al. 2021¹⁴⁹ combine une analyse simple du cycle de vie (ACV), un outil de plantation i-Tree disponible au public et une modélisation de scénarios de séquestration du carbone.

L'objectif de l'étude suivante est d'estimer le potentiel de séquestration et de stockage du carbone des arbres et du biochar amendé dans le milieu de culture (ou la terre végétale) dans les cours résidentielles, et d'identifier des moyens efficaces pour augmenter le potentiel de puits et de stockage de carbone des cours.

Les jardins résidentiels constituent une partie importante de la verdure urbaine, et un nombre croissant d'études soulignent l'importance de la verdure résidentielle privée pour la fourniture de services écosystémiques urbains¹⁵⁰. Bien qu'ils soient encore rarement analysés et cartographiés dans le cadre des espaces verts urbains, certaines études ont indiqué que plus d'un tiers des espaces verts urbains se composent d'espaces verts résidentiels privés dans une ville européenne typique²⁴⁸. Pourtant, il existe peu d'outils pour piloter le processus de planification du lot privé et donc la qualité de l'infrastructure verte des cours et aucun de ces outils de planification ne traite spécifiquement de la séquestration et du stockage du carbone, mais se concentre plutôt sur d'autres avantages du vert urbain

Tout d'abord, la séquestration du carbone cumulée des arbres urbains sur une période de cinquante ans a été évaluée dans la zone étudiée. Ensuite, un scénario optimal a été créé pour le potentiel optimal des parcs étudiés. Le scénario était basé sur l'optimisation de la séquestration du carbone en augmentant à la fois la quantité

¹⁴⁰ Y. Chen, S.D. Day, R.K. Shrestha, B.D. Strahm, P.E. Wiseman Influence of urban land development and soil rehabilitation on soil-atmosphere greenhouse gas fluxes *Geoderma*, 226 (2014), pp. 348-353

¹⁴¹ D. Somerville, P.B. May, S.J. Livesley Effects of deep tillage and municipal green waste compost amendments on soil properties and tree growth in compacted urban soils *J. Environ. Manag.*, 227 (2018), pp. 365-374

¹⁴² B.C. Scharenbroch, J.E. Lloyd, J.L. Johnson-Maynard Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties *Pedobiologia*, 49 (2005), pp. 283-296

¹⁴³ M. Ashman, G. Puri *Essential Soil Science: A Clear and Concise Introduction to Soil Science* John Wiley & Sons (2013)

¹⁴⁴ G. Agegnehu, A.K. Srivastava, M.I. Bird The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review *Appl. Soil Ecol.*, 119 (2017), pp. 156-170

¹⁴⁵ M. Sánchez-García, M.A. Sánchez-Monedero, A. Roig, I. López-Cano, B. Moreno, E. Benitez, et al. Compost vs biochar amendment: a two-year field study evaluating soil C build-up and N dynamics in an organically managed olive crop *Plant Soil*, 408 (2016), pp. 1-14

¹⁴⁶ S.C. Thomas, N. Gale Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses *New For.*, 46 (2015), pp. 931-946

¹⁴⁷ B.C. Scharenbroch, E.N. Meza, M. Catania, K. Fite Biochar and biosolids increase tree growth and improve soil quality for urban landscapes *J. Environ. Qual.*, 42 (2013), pp. 1372-1385

¹⁴⁸ S. Ghosh, L.F. Ow, B. Wilson Influence of biochar and compost on soil properties and tree growth in a tropical urban environment *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 12 (2015), pp. 1303-1310

¹⁴⁹ Ariluoma, M., Ottelin, J., Hautamäki, R., Tuhkanen, E.-M. & Mänttari, M. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki. *Urban For. Urban Green.* 57, 126939 (2021)

¹⁵⁰ D. Haase, C. Jänicke, T. Wellmann Front and back yard green analysis with subpixel vegetation fractions from earth observation data in a city *Landsc. Urban Plan.*, 182 (February 2019) (2019), pp. 44-54

d'arbres et le carbone stocké dans le sol par l'ajout de biochar. Enfin, les implications des résultats à l'échelle de la ville ont été estimées et discutées.

Afin d'explorer le potentiel maximum de séquestration du carbone dans les zones urbaines, un *scénario de test optimal* a été créé. Dans les scénarios de conception, l'objectif était de maximiser le nombre d'arbres, car la littérature antérieure a suggéré que le rôle des autres végétaux urbains est faible dans la séquestration du carbone¹⁵¹.

Les arbres de la zone étudiée séquestreraient un total de 38 t de CO₂ pendant 50 ans si les arbres étaient situés en plein soleil et si le taux de mortalité était moyen, ce qui est un scénario réaliste. Cela équivaut à 95 kg de CO₂ séquestrés par habitant et 2,4 kg de CO₂/ m² de surface au sol pendant toute la durée de l'étude. Cependant, ce scénario est peu probable dans le contexte urbain car les bâtiments entourant les arbres urbains leur projettent généralement de l'ombre pendant au moins une partie de la journée.

Dans les scénarios, une mortalité annuelle moyenne des arbres (2 %) a été utilisée. Le taux de mortalité affecte également de manière significative la séquestration du carbone. Avec une faible mortalité des arbres (1%), la séquestration du carbone augmente à 44 t CO₂ en 50 ans (en plein soleil). Respectivement, une mortalité élevée des arbres (6%) la diminue à 31 t CO₂.

L'optimisation du nombre d'arbres et des espèces d'arbres augmenterait la séquestration totale de carbone des arbres dans la zone étudiée de 95 % sur 50 ans. Il convient de noter que dans le scénario de test optimal, on suppose que le biochar ajouté au milieu de culture améliore l'état des arbres de *bon* à *excellent* et réduit le taux de mortalité annuel des arbres de *moyen* (2 %) à *faible* (1 %). Cependant, les conditions d'ensoleillement et d'ombre sont difficiles à modifier en milieu urbain, et donc les arbres sont supposés être en plein soleil même dans le scénario de test optimal.

L'ajout de biochar au milieu de culture augmente considérablement le stockage du carbone. Dans le scénario de test optimal de l'étude, 15 % du volume total du milieu de culture était du biochar. Lorsque le biochar ajouté a été pris en compte, la quantité totale de carbone séquestré et stocké était de 208 t CO₂ après 50 ans dans le scénario de test optimal, composée de 73 t CO₂ séquestrées par les arbres et de 135 t CO₂ stockées sous forme de biochar dans le sol. La quantité est égale à 520 kg CO₂ par habitant, soit 5 fois la valeur initiale.

Les résultats démontrent qu'en plus du nombre d'arbres, la quantité de terre végétale dans la cour, qui résulte du type de plantation, a un impact majeur sur le potentiel de stockage du carbone de la cour. Bien que le nombre total d'arbres dans les scénarios de conception n'étaient pas radicalement plus élevé que dans les conceptions originales, il y avait plus de zones de plantation, ce qui a donné lieu à une plus grande quantité de terre végétale productive et donc à une quantité potentiellement plus importante de biochar ajouté.

Dans le scénario de référence, les arbres de la zone étudiée capteraient un total de 38 t de CO₂ en 50 ans, ce qui équivaut à 95 kg de CO₂ captées par habitant et à 2,4 kg de CO₂/m² de surface au sol pendant toute la période de 50 ans. À titre de comparaison, l'empreinte carbone moyenne des habitants de la zone métropolitaine d'Helsinki est de 10 t d'équivalent CO₂/an par habitant. Bien que le potentiel de séquestration du carbone des cours résidentielles soit faible par rapport à l'empreinte carbone annuelle des résidents), il pourrait être significatif à l'échelle de la ville. À titre d'exemple, si tous les résidents d'Helsinki avaient (en moyenne) un puits et un stockage de carbone similaires dans leurs cours que les résidents de la zone étudiée dans le scénario de test optimal (soit 520 kg de CO₂ par habitant pendant 50 ans), cela représenterait 330 000 t de CO₂.

Selon les estimations, le stockage de carbone dans le sol des parcs urbains d'Helsinki serait de 10,4 kg C/m² (tous types de sol) et de 15,5 kg C/m² en moyenne pour les sols végétalisés. Sur la base de ces chiffres, le stockage de carbone dans le sol des sites étudiés serait de 42,6 t C (156,3 t CO₂) au total, ce qui représente plus du double de la séquestration par les arbres plantés pendant 50 ans dans la situation optimale (73 t CO₂).

Les résultats soulignent que le potentiel peut être considérablement amélioré par quatre mesures : (1) augmenter le nombre d'arbres, (2) sélectionner des espèces d'arbres ayant une grande capacité à séquestrer le carbone et à pousser en grand sur place et (3) maximiser les zones végétalisées dans les jardins et (4) ajouter du biochar dans les plates-bandes et les sols. L'étude conclut que le moyen le plus efficace d'augmenter le stockage du carbone

¹⁵¹ Z.G. Davies, J.L. Edmondson, A. Heinemeyer, J.R. Leake, K.J. Gaston Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale J. Appl. Ecol., 48 (5) (2011), pp. 1125-113

urbain dans les nouveaux jardins résidentiels est de se concentrer sur la qualité et la quantité de la couche arable avec ajout du biochar qui fonctionne comme un milieu de culture productif pour les plantes.

Considérant que le biochar a le potentiel d'améliorer la qualité du sol et donc de réduire l'utilisation d'autres matériaux de sol de plantation, tels que la tourbe, dans les mélanges de sols de plantation, l'impact réel de l'utilisation du biochar pourrait être encore plus élevé¹⁵². Le biochar peut améliorer les conditions de croissance des microbes du sol¹⁵³ et ont d'autres effets sur les processus du sol¹⁵⁴ ce qui peut conduire à une augmentation du carbone lié à la matière organique dans le milieu de culture. D'autre part, les arbres exsudent des composés organiques des racines vers le sol, qui à son tour affecte la communauté microbienne et la flore et la faune du sol. Ainsi, l'interaction des arbres, du biochar et du sol dans la séquestration du carbone pourrait augmenter le carbone du sol plus que leurs effets séparés considérés dans cette étude.

La méthode de production du biochar peut influencer sur son impact sur le climat. À l'échelle de la ville, il serait possible de collecter la biomasse morte générée par les espaces verts urbains et de produire du biochar à partir de celle-ci, créant ainsi un système circulaire. Par exemple, la ville de Stockholm a commencé à utiliser les déchets des parcs et des jardins pour produire du biochar qui est appliqué aux milieux de culture urbains et aux sols structurels pour les plantations d'arbres (voir encadré).

L'étude conclut que la séquestration du carbone doit faire l'objet d'une attention accrue dans les outils de planification de la durabilité, tels que LEED. Par exemple, une plus grande importance pourrait être accordée à la plantation d'arbres, en particulier d'espèces d'arbres à forte capacité de séquestration du carbone (dans les conditions locales). En outre, les conditions de croissance devraient être prises en compte pour garantir que les arbres plantés puissent pousser en grand. De plus, l'utilisation de biochar pour augmenter les stockages de carbone des jardins pourrait être un moyen efficace. Les résultats de l'étude suggèrent que le carbone actuel des sites résidentiels pourrait être augmenté jusqu'à 450 % en développant une planification verte afin qu'elle prenne mieux en compte ces aspects.

En résumé

Les applications du biochar dans les villes présentent d'importantes synergies avec différents types de végétation urbaine. Par exemple, l'ajout de biochar aux arbres, aux arbustes, aux pelouses et aux toits verts d'Helsinki pourrait stocker 300 000 tCO₂ pendant 50 ans, le biochar étant responsable de 65 % du carbone stocké.

Cette étude souligne l'importance des espaces verts urbains et leur rôle dans le stockage du carbone. En particulier, le sol additionné de biochar peut être une méthode efficace pour augmenter le potentiel de stockage du carbone. De plus, les arbres urbains peuvent contribuer de manière significative à la séquestration du carbone à long terme. La longue durée de vie des arbres urbains doit être garantie car la capacité de séquestration du carbone augmente à mesure que les arbres mûrissent. Cela nécessite de l'espace pour les arbres à la fois dans le sol et sur le sol et des conditions de croissance favorables qui, à leur tour, accentuent la qualité et la quantité de la couche arable. La quantité de terre végétale est corrélée au potentiel de stockage du carbone, à la fois en termes d'arbres et de biochar, et les jardins avec une couche de sol épaisse doivent donc être privilégiés.

Bien que l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets aient été prises en compte dans la planification des infrastructures vertes, le potentiel de stockage du carbone urbain est resté largement sous-étudié. L'étude recommande que des outils de planification de la durabilité soient développés afin de mieux prendre en compte le potentiel de séquestration du carbone, en mettant l'accent sur le sol. Cela conduirait à une situation gagnant-gagnant, car un sol de haute qualité améliore la qualité de l'infrastructure verte, qui à son tour a la capacité de fournir plusieurs services écosystémiques. Même si les jardins individuels ont un impact assez limité sur le stockage du carbone, une mise à l'échelle au niveau de la ville augmenterait certainement considérablement l'impact.

¹⁵² J. Kern, P. Tammeorg, M. Shanskiy, R. Sakrabani, H. Knicker, C. Kammann, E.

M. Tuhkanen, G. Smidt, M. Prasad, K. Tiilikkala, S. Sohi, G. Gasco, C. Steiner, B. Glaser Synergistic use of peat and charred material in growing media – an option to reduce the pressure on peatlands? *J. Environ. Eng. Landsc. Manage.*, 25 (2) (2017), pp. 160-174

¹⁵³ K.Y. Chan, L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, S. Joseph Using poultry litter biochars as soil amendments *Aust. J. Soil Res.*, 46 (5) (2008), pp. 437-444

¹⁵⁴ J. Cheng, X. Lee, W. Gao, Y. Chen, W. Pan, Y. Tang Effect of biochar on the bioavailability of difenoconazole and microbial community composition in a pesticide-contaminated soil *Appl. Soil Ecol.*, 121 (2017), pp. 185-192

En outre, les conditions de croissance devraient être prises en compte pour garantir que les arbres plantés puissent pousser en grand. De plus, l'utilisation de biochar pour augmenter les stockages de carbone des jardins pourrait être un moyen efficace. Les résultats de l'étude suggèrent que le carbone actuel des sites résidentiels pourrait être augmenté jusqu'à 450 % en développant une planification verte afin qu'elle prenne mieux en compte ces aspects.

Recommandations

La ville de Montréal aurait tout intérêt à envisager l'intégration du biochar dans sa stratégie de carboneutralité.

De plus Montréal devrait envisager de collaborer avec la population afin d'améliorer la séquestration du carbone des sols dans les jardins individuels en leur fournissant notamment du biochar et en les encourageant à planter plus d'arbres.

Encadré

Pour améliorer la santé et la survie des arbres, la capitale suédoise Stockholm teste et affine l'utilisation de sols structurés et de biochar depuis 2009.

Les arbres urbains sont confrontés à divers défis qui conduisent souvent à une mortalité élevée, à une durée de vie plus courte et à des coûts d'entretien plus élevés. Pour améliorer la santé et la survie des arbres, la capitale suédoise Stockholm teste et affine l'utilisation de sols structurés et de biochar depuis 2009.

Ces sols structurés sont constitués de gravier mélangé à des amendements de sol plus petits tels que le biochar. Dans certains cas, des arbres de 6 ans plantés dans des sols structurés avec du biochar étaient cinq fois plus grands que des arbres de 30 ans plantés à l'aide de techniques de plantation d'arbres urbains plus traditionnelles.

Les trottoirs ajoutent des contraintes importantes à la capacité des arbres à prospérer, car ils limitent considérablement la disponibilité de l'eau et de l'oxygène aux racines des arbres. L'asphyxie et la mort des arbres sont une conséquence courante de ces contraintes. Depuis 2001, Bjorn Embrén un horticulteur diplômé est responsable des arbres à l'administration de la circulation de la ville de Stockholm Son équipe et lui ont développé une combinaison de stratégies, notamment l'utilisation de sols structurés, pour recréer efficacement un environnement plus naturel pour les arbres urbains. L'objectif était de recréer, aussi fidèlement que possible, les voies hydrologiques et les mécanismes de filtration de la nature.

La première étape a consisté à remplacer les sols fortement compactés sous la chaussée par une épaisse couche de pierres, car les pierres sont imperméables au compactage, ce qui permet l'échange de gaz et la pénétration de l'eau. Au départ, deux couches séparées de pierres de tailles différentes ont été utilisées, mais l'expérience a montré que l'utilisation d'une couche épaisse de pierres de 32 à 63 mm fonctionne tout aussi bien, voire mieux.

Au début, l'équipe utilisait des sols structurés en arrosant la terre entre les pierres pour fournir un substrat de croissance suffisant aux arbres. Depuis 2009, son équipe a opté pour l'utilisation de biochar au lieu de terre pour tous ses projets de plantation d'arbres urbains. Ils ont découvert que le principal avantage du biochar pour les projets d'arbres urbains par rapport aux autres amendements du sol est qu'il résiste à la compression et au compactage, qui sont considérés comme l'une des plus grandes menaces pour les arbres et autres plantes vivaces dans les parcs et les rues urbains. Le mélange de pierres concassées et de biochar entraîne un meilleur taux de vide, également connu sous le nom de porosité, dans le sol (environ 40 %). Une porosité accrue facilite un meilleur échange de gaz, la perméabilité conduisant à une meilleure pénétration des racines.

Une autre amélioration de leurs méthodes a été de livrer le biochar et les pierres pré-mélangés, ressemblant beaucoup à du charbon. Ils ont découvert que cela permet d'économiser jusqu'à 25 % de temps et de main-d'œuvre. La taille de particule préférée du biochar est comprise entre 1 et 10 mm et ils recommandent actuellement environ 2,25 mètres cubes de biochar pour chaque arbre urbain. Embrén et son équipe ont expérimenté différentes quantités de biochar et ont testé une gamme de 10 à 25 % en volume pour comprendre le meilleur équilibre entre la capacité de rétention d'eau et les débits d'infiltration. Ils ont également expérimenté différents types d'engrais à incorporer dans le biochar pour favoriser la santé à long terme des arbres urbains. Le fait d'avoir du biochar pré-fertilisé pour une croissance optimale des arbres urbains offrirait des avantages significatifs aux équipes d'aménagement paysager urbain.

Biochar produit de manière durable

Bien que tous ces résultats aient été extrêmement positifs, pour être véritablement durable, l'objectif a été d'utiliser du biochar produit localement à partir de biomasse sous-utilisée. Pour atteindre cet objectif, la ville de Stockholm a lancé le [projet Stockholm Biochar](#), dont l'objectif est de produire à la fois du biochar et de l'énergie renouvelable à partir de déchets

verts urbains collectés dans les parcs municipaux et auprès des résidents de la ville. Cette biomasse particulière est souvent difficile à éliminer et très sous-utilisée.

L'équipe du projet Stockholm Biochar a réussi à remporter l'un des cinq prix convoités du Mayors Challenge 2014 financé par Bloomberg Philanthropies et l'organisation EUROCITIES, qui leur a rapporté 1 million d'euros à utiliser pour mettre en place leur première usine pilote.

Une fois l'usine pilote opérationnelle, prévue pour mi-2016, la chaleur générée lors de la production sera ajoutée à un réseau de chauffage local ou urbain. Le biochar sera utilisé à la fois par les habitants de la ville et par les paysagistes urbains dans les parcs publics et les massifs d'arbres urbains. L'usine pilote pourra produire 300 tonnes de biochar par an. À pleine échelle, la production de biochar atteindra 1 500 tonnes par an !

En utilisant du biochar dans les espaces verts de la ville, les puits de carbone, les plantes poussent facilement et les eaux pluviales s'infiltrant efficacement, contribuant ainsi à gérer les inondations. En outre, une ville plus verte apporte toute une série d'avantages auxiliaires tels qu'un air plus pur, une biodiversité accrue tout en luttant contre les effets des îlots de chaleur.

Bien que le biochar ne soit pas encore reconnu comme un produit de compensation en Suède, les acteurs du secteur du biochar en Suède travaillent pour que cela se réalise. Certaines des grandes entreprises énergétiques suédoises sont également très favorables à cette idée. Étant donné que l'utilisation du biochar a considérablement amélioré la qualité des eaux pluviales, de nombreux acteurs du secteur du traitement des eaux soutiennent également le mouvement du biochar à Stockholm.

Lorsqu'on lui demande quels conseils il pourrait donner aux autres villes sur l'utilisation du biochar dans les sols urbains, Embran répond avec enthousiasme : « Osez l'essayer et vous serez convaincus ! » En effet, la ville a déjà inspiré et formé de nombreux paysagistes qui cherchent à reproduire le succès qu'ils ont connu avec des arbres urbains sains et durables : une fois que la production locale de biochar sera opérationnelle, elle prévoit d'organiser une conférence internationale et d'inviter des urbanistes et des paysagistes du monde entier à venir apprendre comment mettre en œuvre leurs propres systèmes d'aménagement paysager en boucle fermée et à bilan carbone négatif.



Les premiers arbres de Stockholm plantés dans des substrats contenant du biochar



Photographe : Kari Kohvakka
Usine de production de biochar



Photo de : Ville de Stockholm

Les plates-bandes sont généralement constituées d'un mélange de biochar et de macadam. Lorsque le biochar et le macadam sont mélangés, le carbone s'accumule dans les cavités situées entre les pierres concassées

4 Conclusion et recommandations générales

4.1 Les espaces verts urbains, de nombreux cobénéfices au-delà du stockage du carbone

Au-delà de leur fonction de puits de carbone, les espaces verts urbains créent des possibilités accrues de loisirs et de sports, ce qui a un impact bénéfique sur les individus et les communautés physiquement, psychologiquement et socio-économiquement. En entremêlant leurs fonctions sociales et écologiques, les arbres de rue et les infrastructures vertes dans les villes contribuent à sensibiliser au rôle clé de la nature dans la lutte contre le changement climatique tout en répondant à l'anxiété croissante face à l'urbanisation rapide et à la détérioration de la qualité de l'environnement¹⁵⁵.

De même, le déploiement d'un réseau connecté d'espaces verts dans l'ensemble des infrastructures de la ville pourrait favoriser le transport actif, améliorant ainsi la qualité de l'air tout en réduisant les émissions¹⁵⁶. Les synergies entre la végétation et les stratégies de décarbonation des villes découlent également des avantages rafraîchissants des espaces verts fournis par l'ombrage, réduisant ainsi la demande d'énergie de refroidissement dans les bâtiments. Les mécanismes d'évapotranspiration de la végétation urbaine peuvent également contribuer à lutter contre la mortalité liée à la chaleur dans les villes en abaissant les températures de surface et de l'air des zones urbaines¹⁵⁷.

Par ailleurs, les effets bénéfiques de la végétation urbaine peuvent être encore amplifiés par l'ajout de biochar aux substrats urbains, favorisant la fertilité des sols et donc la prospérité des arbres de rue et des toits verts dans un environnement de croissance autrement difficile¹⁵⁸. En outre, une végétation florissante peut également soutenir les efforts de conservation de la biodiversité dans les villes^{159, 160}.

Le biochar a également le potentiel de contribuer à une économie urbaine circulaire grâce au recyclage des déchets. Les matières premières urbaines pour la production de biochar, telles que les déchets municipaux et de jardin, peuvent être pyrolysées en biochar, la chaleur résiduelle résultante étant utilisée comme un produit précieux pour différents réseaux de chauffage. Le biochar produit peut restituer des nutriments aux sols urbains, valorisant les déchets des espaces verts urbains et fermant partiellement le cycle des déchets organiques urbains.

¹⁵⁵ Wang, Y., Chang, Q. & Li, X. Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing. *Urban For. Urban Green.* 64, 127291 (2021).

¹⁵⁶ Nieuwenhuijsen, M. J. & Khreis, H. Car free cities: Pathway to healthy urban living. *Environ. Int.* 94, 251–262 (2016).

¹⁵⁷ Rahaman, Z. A. et al. Assessing the impacts of vegetation cover loss on surface temperature, urban heat island and carbon emission in Penang city, Malaysia. *Build. Environ.* 222, 109335 (2022).

¹⁵⁸ Embren, B. Planting Urban Trees with Biochar. *Biochar J.* (2016).

¹⁵⁹ Goddard, M. A., Dougill, A. J. & Benton, T. G. Scaling up from gardens: biodiversity conservation in 917 urban environments. *Trends Ecol. Evol.* 25, 90–98 (2010).

¹⁶⁰ Kabisch, N. et al. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecol. Soc.* 21, (2016).

Comme on a pu le constater tout au long de ce mémoire les solutions fondées sur la nature et le biochar peuvent jouer un rôle crucial dans la démarche de de carboneutralité entreprise par la ville de Montréal en permettant l'élimination et une séquestration accrue du CO₂ autant dans la végétation que dans les sols urbains

4.2 Recommandations générales

Voici quelques recommandations générales :

- La mise en place d'une réglementation forçant l'installation de toits verts sur toutes les nouvelles construction commerciale et industrielle seraient fortement à considérer.
- Les arbres de rue constituent aussi une excellente solution fondée sur la nature pour l'atténuation de la chaleur et pour la verdure. Par conséquent Montréal devrait entreprendre un vaste chantier de plantation d'arbres au-delà des 500 000 prévues à l'horizon 2030 tout en se concentrant en priorité sur les secteurs les plus désavantagés afin de diminuer le taux de mortalité des populations les plus vulnérables.
- Montréal aurait aussi tout intérêt à quantifier la séquestration du carbone potentiel et réel associée à la plantation de nouveau arbres et des autres solution fondes sur la nature afin d'intégrer le tout dans son bilan carbone.
- Montréal aurait donc tout intérêt à mettre en place un programme d'entretien et de survie de ses arbres de rues afin de maximiser la séquestration du carbone de cette solution fondées sur la nature.
- Montréal devrait envisager d'introduire des politiques visant à réglementer ou à encourager la conversion des zones d'herbe tondue sans arbres en zones arbustives et/ou en paysages arborés, en éliminant l'herbe tondue autant que possible et, lorsque les circonstances l'exigent, en conservant les arbres avec un minimum d'herbe
- Montréal aurait tout intérêt à envisager la production et l'utilisation du biochar dans sa stratégie de carboneutralité.