



**Augmenter l'adaptation équitable
aux changements climatiques :**

**Scénarisation de la plantation de
500 000 nouveaux arbres sur le
territoire de la Ville de Montréal**

Citation suggérée

Fondation David Suzuki (2022). Augmenter l'adaptation équitable aux changements climatiques : Scénarisation de la plantation de 500 000 nouveaux arbres sur le territoire de la Ville de Montréal. Fondation David Suzuki. 57 PP

Ce rapport et les analyses ont été réalisés par la firme **Habitat** pour la Fondation David Suzuki. Habitat est une entreprise de solutions environnementales fondée en 2017 (d'abord connue sous le nom d'Eco2urb) et basée à Montréal dont la mission est d'accélérer la transition écologique à l'aide de solutions ancrées dans la nature et la science.

Auteur.e.s

Olivier Tanguy, M. Sc. – Habitat
Kyle T. Martins, M. Sc. – Habitat
Fanny Maure, Ph. D. – Habitat
Annick St-Denis, Ph. D. – Habitat
Catherine Hallmich, M. Sc. – Fondation David Suzuki

Direction

Catherine Hallmich, M. Sc. – Fondation David Suzuki

Révision scientifique externe

Louise Hénault-Ethier, Ph. D., professeure associée, Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de recherche scientifique (INRS)

Maxime Fortin Faubert, Ph. D., étudiant postdoctoral à l'INRS et chercheur invité de la Fondation David Suzuki

© Fondation David Suzuki

ISBN : 978-1-988424-90-3

Mise en page: Annie Trudeau – Fondation David Suzuki

Photos de couverture: Guillaume Bergaglia, Etienne Delorieux, Juan Rojas

Pour toute demande de renseignements, veuillez communiquer avec la Fondation David Suzuki :

540 – 50, rue Sainte-Catherine Ouest

Montreal QC H2X 3V4

514-871-4932

info@davidsuzuki.org

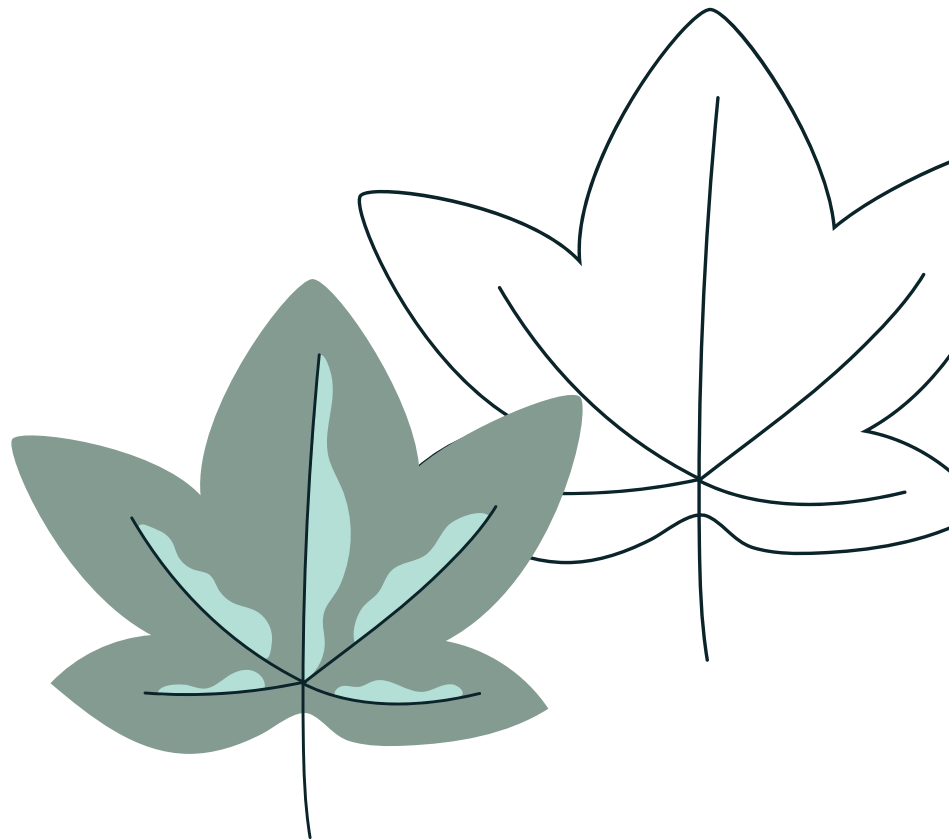


Fondation David Suzuki

Établie en 1990, la Fondation David Suzuki a pour mission de protéger l'environnement et notre qualité de vie, maintenant et pour l'avenir. Par la science, la sensibilisation et l'engagement du public, et des partenariats avec les entreprises, les gouvernements et les acteurs de la société civile, la Fondation œuvre à définir et à mettre en place des solutions permettant de vivre en équilibre avec la nature. La Fondation compte sur l'appui de 300 000 sympathisants à travers le Canada, dont près de 100 000 au Québec.

Habitat

Habitat est une entreprise de solutions environnementales fondée en 2017 (d'abord connue sous le nom d'Eco2urb) et basée à Montréal dont la mission est d'accélérer la transition écologique à l'aide de solutions ancrées dans la nature et la science. Elle propose des solutions fondées sur la nature pour alimenter et propulser la transition écologique de ses client.e.s, notamment dans un contexte de relance verte. Habitat est née d'une mise en commun des expertises de trois laboratoires de pointe dans le domaine des sciences humaines et naturelles. À la tête de l'entreprise, on retrouve les professeurs Dupras, Gonzalez et Messier, tous reconnus à l'échelle internationale dans leurs domaines. L'équipe collabore avec de nombreuses universités, centres de recherche et organisations non gouvernementales afin de faciliter la mise en œuvre de travaux scientifiques reliés à l'écologie, la foresterie et l'aménagement du territoire. Elle propose des approches innovatrices et des stratégies environnementales à la fine pointe de la science.



Sommaire exécutif

Dans le contexte actuel des changements globaux, les forêts urbaines font face à de nombreux facteurs de stress. Le risque de les voir dépérir du fait de conditions climatiques plus difficiles, de l'établissement d'insectes ou de maladies exotiques est de plus en plus inquiétant. Pourtant, en plus de leurs rôles esthétique, récréatif et patrimonial, les forêts urbaines fournissent des services écosystémiques essentiels à notre bien-être et favorisent l'adaptation aux changements climatiques, particulièrement en milieu urbain (Ordóñez et Duinker 2014).

Dans son Plan Climat 2020—2030, la Ville de Montréal place l'adaptation, la résilience face aux changements climatiques et l'équité au cœur de ses objectifs climatiques. Comme mesure phare d'adaptation et de résilience, la municipalité s'est notamment engagée à planter 500 000 nouveaux arbres dans des zones vulnérables aux vagues de chaleur d'ici 2030, en plus d'établir une cible de canopée de 26 % d'ici 2025 (Ville de Montréal 2020 ; 2022). Afin d'y arriver, certains prérequis sont nécessaires, par exemple, l'identification des sites de plantation prioritaires et la sélection des espèces à planter. Compte tenu que l'élaboration et le succès des mesures d'adaptation des villes aux changements climatiques demeurent peu connus, cette étude vise à optimiser la plantation de ces 500 000 arbres en utilisant des indicateurs socioéconomiques et écologiques afin de maximiser l'adaptation de façon durable et de quantifier les retombés écosystémiques. Ainsi, ce rapport propose une méthodologie pour accompagner les villes désirant augmenter l'équité et la résilience de leur forêt urbaine selon les besoins socioéconomiques et écologiques de chaque quartier. Cette étude s'inscrit dans le cadre des efforts de la Fondation David Suzuki visant à aider les municipalités canadiennes à lutter contre les aux changements climatiques par l'amélioration des connaissances, d'outils et d'indicateurs d'adaptation.

La présente étude répond à trois questions primordiales associées à la mise en œuvre de la plantation d'arbres comme mesure d'adaptation aux changements climatiques en territoire municipal :

- Où est-il possible de planter ?
- Où faudrait-il planter en priorité pour répondre à des enjeux d'équité sociale et de résilience face aux changements climatiques ?
- Quelles espèces d'arbres faudrait-il privilégier pour assurer la pérennité de la forêt urbaine et des services écosystémiques?

Pour ce faire, l'étude examine un scénario de plantation « optimisé » à l'aide de huit critères socio-économiques et écologiques, dont la vulnérabilité à cinq aléas climatiques (vagues de chaleur, sécheresses, pluies abondantes, crues et tempêtes), le niveau de défavorisation des habitants, la canopée et la diversité fonctionnelle des arbres. L'étude crée également un scénario « adaptation et résilience », qui sélectionne les espèces d'arbres en fonction de leur diversité fonctionnelle et de leur résistance au risque climatique local dominant afin d'en étudier les effets sur la résistance aux aléas climatiques, la diversité fonctionnelle, et les services écosystémiques.

Ce rapport propose une méthodologie pour accompagner les villes désirant s'adapter au climat et augmenter l'équité et la résilience de leur forêt urbaine.

L'étude examine également les espèces d'arbres à favoriser sur le territoire.

En utilisant des paramètres théoriques appliqués au territoire montréalais, l'approche développée a permis d'en venir aux constats suivants :

- Les zones et le nombre d'arbres à planter en priorité pour augmenter l'équité et la résilience varie grandement d'un arrondissement à l'autre, certains devant en planter beaucoup plus que d'autres afin d'augmenter la canopée et de permettre à la population de bénéficier des services rendus par la forêt urbaine. Une carte montrant le nombre d'arbres à planter en priorité sur le territoire de la Ville de Montréal est fournie à l'Annexe G. La couche géomatique correspondante peut être téléchargée sur [le site de la Fondation David Suzuki](#) ;
- En sélectionnant les espèces d'arbres à planter selon leur résistance à l'aléa climatique dominant local et leur diversité fonctionnelle (scénario favorisant l'adaptation et la résilience), il est possible d'augmenter l'indice de diversité fonctionnelle de la forêt urbaine montréalaise de 3,7 à 8,2 (sur 9). Cette diversité fonctionnelle élevée assurerait une résilience de la canopée face aux menaces climatiques et biotiques et réduirait ainsi les risques de mortalité à moyen et long terme ;
- Selon le même scénario, augmenter la diversité fonctionnelle permettrait aussi d'atteindre une canopée plus élevée et une meilleure adaptation aux vagues de chaleur, aux sécheresses et aux tempêtes (vents violents) à l'échelle des 500 000 nouveaux arbres. Par contre, ce scénario offre une moins bonne résistance aux pluies abondantes et aux crues et une légère diminution de certains services écosystémiques, dont la filtration des polluants de l'air, la captation des eaux de ruissellement et la séquestration et le stockage de carbone. Ce résultat s'explique par la surreprésentation actuelle du genre *Acer* (érables) qui, dans le scénario « adaptation et résilience » est rééquilibrée en faveur d'une plus grande diversité fonctionnelle et donc d'une plus grande résilience de la forêt urbaine à long terme.
- La participation des résidents et du secteur privé est essentielle pour contribuer à l'augmentation de la canopée de Montréal, compte tenu que plus de 60 % de la superficie potentielle totale de plantation est localisée en terrain privé et que plus du tiers de la superficie en zone non minéralisée (« prête-à-planter ») est située sur des terrains résidentiels ;

Cette étude fournit une base méthodologique robuste qui permet aux villes d'élaborer une stratégie de plantation ciblée sur l'adaptation climatique de manière équitable, tout en maximisant la résilience de la forêt urbaine à long terme. Elle démontre que les villes peuvent accélérer leurs efforts d'adaptation climatique et en maximiser les retombées en utilisant des critères socio-économiques et écologiques, tels que la vulnérabilité climatique, la défavorisation, la canopée et la diversité fonctionnelle. Puisqu'elle repose sur un modèle théorique et modulable, la méthodologie peut être adaptée ou peaufinée en ajustant les paramètres selon les contraintes et les objectifs définis par les gestionnaires de la ville où elle est appliquée afin d'être encore plus efficace et réaliste. À titre d'exemple, cette approche pourrait servir à optimiser la plantation des espèces selon qu'elles soient tolérantes au sel de déglacage, capables d'améliorer substantiellement la qualité de l'air le long des grands axes routiers, ou encore, pour éviter les espèces allergènes dans les quartiers densément peuplés.

Augmenter la diversité fonctionnelle permettrait d'atteindre une canopée plus élevée et une meilleure adaptation aux vagues de chaleur, aux sécheresses et aux tempêtes.

Tables des matières

Sommaire exécutif	iii
1. Introduction	3
1.1 Description de l'approche globale développée	3
2. Portrait de la canopée actuelle de Montréal et de sa diversité fonctionnelle	6
3. Identification des zones potentielles pour la plantation d'arbres	8
3.1 Approche développée	8
3.2 Zones potentielles de plantation à Montréal	8
3.3 Nombre potentiel maximal d'arbres	11
4. Identification des zones à prioriser pour la plantation d'arbres selon des critères d'équité sociale et de résilience face aux changements globaux	14
4.1 Approche développée	14
4.2 Scénario de plantation optimisé	16
4.3 Comparaison du scénario de plantation optimisé avec le scénario aléatoire	20
5. Sélectionner les espèces d'arbres à planter pour augmenter la résilience	22
5.1 Approche développée	22
5.2 Évaluation des scénarios face aux aléas climatiques	25
5.3 Évaluation des scénarios pour l'approvisionnement en services écosystémiques et l'amélioration de l'indice de canopée	26
5.4 Évaluation des scénarios en termes de diversité fonctionnelle	27
6. Discussion	29
6.1 Une méthodologie facile à modifier et à bonifier	29
6.2 Vers la résilience et la durabilité de nos forêts urbaines	30
7. Conclusion et recommandations	31
8. Bibliographie	33
9. Annexes	35
Annexe A : Méthodologie pour évaluer la diversité fonctionnelle	35
Annexe B : Méthodologie pour l'identification des zones potentielles de plantation	39
Annexe C : Vulnérabilités climatiques et grille d'analyse	43
Annexe D : Comparaison des scénarios de plantation distinguant les zones de plantation situées en zones minéralisées ou non minéralisées	45
Annexe E : Liste des espèces incluses dans les simulations	46
Annexe F : Méthodologie pour évaluer la résistance et la vulnérabilité des arbres à planter aux aléas climatiques dans le cadre des scénarios « adaptation et résilience » et « statu quo »	47
Annexe G : Carte de plantation d'arbres pour augmenter la résilience et l'équité face aux changements climatiques	49

Liste des figures

Figure 1. Approche globale développée pour la comparaison des scénarios de plantation des 500 000 nouveaux arbres à l'échelle de la Ville de Montréal	4
Figure 2. Cartographie du territoire de la Ville de Montréal et de son découpage en cellules d'analyse de 250 m x 250 m	5
Figure 3. Illustration de l'identification des zones potentielles de plantation dans les arrondissements de Saint-Léonard (1) et Rosemont-La-Petite-Patrie (2)	9
Figure 4. Proportion (en %) des superficies disponibles à la plantation en zones non minéralisées selon le type d'utilisation du territoire de Montréal (CMM 2020)	10
Figure 5. Cartographie du nombre d'arbres maximum à planter par cellule d'analyse (250 m x 250 m) sur le territoire de la Ville de Montréal, A) en zone non minéralisée et minéralisée; B) en zone minéralisée seulement, C) en zone non minéralisée seulement	13
Figure 6. Illustration des scores obtenus pour chaque type d'indices utilisés dans le scénario de plantation optimisé A : Superposition des 5 indices de vulnérabilités aux aléas climatiques (voir annexe C, figure C1 pour le détail pour chaque aléa climatique) ; B : Indice de canopée ; C : Indice canadien de défavorisation multiple ; D : Indice de diversité fonctionnelle	16
Figure 7. Cartographie des zones à prioriser pour la plantation et du nombre d'arbres à planter par cellule d'analyse (250 m x 250 m) sur le territoire de la Ville de Montréal selon le scénario de plantation optimisé, A) en zone non minéralisée et minéralisée ; B) en zone minéralisée seulement, C) en zone non minéralisée seulement. La couche géomatique montrant le nombre d'arbres à planter en priorité (A) est disponible sur le site de la Fondation David Suzuki	17
Figure 8. Agrandissements de trois secteurs de la Ville de Montréal jugés prioritaires pour la plantation d'arbres selon les critères socio-écologiques retenus : 1) nord du quartier de Viauville dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, 2) boulevard Gouin dans l'arrondissement Ahuntsic-Cartierville, 3) parc Frédéric-Back dans l'arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension	20
Figure 9. Comparaison du scénario de plantation optimisé et du scénario de plantation aléatoire sur la base des scores obtenus pour chacun des critères socioéconomiques et écologiques	21
Figure 10. Comparaison de résistance aux aléas climatiques des 500 000 nouveaux arbres entre les scénarios de plantation « adaptation et résilience » et « statu quo »	25
Figure 11. Comparaison de la contribution en services écosystémiques pour les scénarios de plantation « adaptation et résilience » et « statu quo » pour les 500 000 nouveaux arbres plantés à l'échelle de la Ville de Montréal. Les barres d'erreurs représentent les écarts-types pour chacune des estimations	26
Figure 12. Comparaison des indices de diversité fonctionnelle moyens à l'échelle des cellules d'analyse pour les scénarios de plantation « adaptation et résilience » et « statu quo » après plantation des 500 000 nouveaux arbres sur le territoire de la Ville de Montréal	27
Figure 13. Nombre d'arbres à planter en priorité sur le territoire de la Ville de Montréal pour augmenter la résilience et l'équité face aux changements climatiques (cellules d'analyse 250 m par 250 m)	49

Liste des tableaux

Tableau 1. Indice de canopée actuel pour chacun des arrondissements de la Ville de Montréal	6
Tableau 2. Répartition de la superficie maximale potentielle de plantation sur le territoire de la Ville de Montréal, selon la localisation des sites en zone non minéralisée ou minéralisée et de tenure publique ou privée	10
Tableau 3. Répartition du nombre maximal d'arbres pouvant être plantés sur le territoire de la Ville de Montréal, selon la localisation des sites en zone non minéralisée ou minéralisée et de tenure publique ou privée	11
Tableau 4. Répartition du nombre maximal d'arbres pouvant être plantés pour chacun des arrondissements de la Ville de Montréal selon l'approche développée et augmentation potentielle maximale de leur indice de canopée	12
Tableau 5. Critères socio-écologiques considérés dans l'analyse de priorisation des zones de plantation à l'échelle de la Ville de Montréal	15
Tableau 6. Nombre d'arbres à planter par arrondissement du territoire de la Ville de Montréal d'ici à 2030, selon un scénario de plantation optimisé visant l'équité et la résilience face aux CC. Les arrondissements sont présentés par ordre décroissant d'arbres à planter	18
Tableau 7. Synthèse des 10 genres d'arbres les plus abondants selon l'inventaire de la Ville de Montréal (2021) et figurant aussi dans la liste des espèces d'arbres potentielles dans les deux scénarios de plantation (annexe E). Le tableau indique pour chaque genre leur abondance et leur pourcentage relatif par rapport au nombre total d'arbres présents dans l'inventaire trié de la Ville de Montréal	23
Tableau 8. Indicateurs retenus pour mesurer la résistance aux aléas climatiques et l'approvisionnement en services écosystémiques des 500 000 nouveaux arbres plantés selon deux scénarios de plantation à l'échelle des cellules d'analyse (250 m x 250 m)	24

1. Introduction

Dans le contexte actuel des changements globaux (CG)¹, les forêts urbaines font face à de nombreux facteurs de stress. Le risque de les voir dépérir du fait de conditions climatiques plus difficiles ou de l'établissement d'insectes ou de maladies exotiques est de plus en plus inquiétant. Pourtant, en plus de leurs rôles esthétique, récréatif et patrimonial, les forêts urbaines sont essentielles à notre bien-être et à notre santé puisqu'elles nous fournissent de nombreux services. Ces services, dits écosystémiques, incluent par exemple le stockage et la séquestration du carbone, l'amélioration de la qualité de l'air, la régulation des températures ou encore le maintien de la biodiversité. Les services écosystémiques sont primordiaux dans ce contexte environnemental particulier puisqu'ils favorisent l'adaptation aux changements climatiques (CC), particulièrement en milieu urbain (Ordóñez et Duinker 2014).

La Ville de Montréal considère la lutte contre les CC comme l'une de ses priorités et tient à se positionner comme leader mondial. Elle participe d'ailleurs à diverses initiatives innovantes, dont le *Carbon Disclosure Project* (CDP), le *Global Covenant of Mayors* et le C40. Son Plan Climat, publié en 2020 (Ville de Montréal 2020), établit également des objectifs de plantation d'arbres, notamment l'ajout de 500 000 nouveaux arbres sur son territoire d'ici 2030 dans des zones vulnérables aux vagues de chaleur. L'atteinte de cet objectif demande toutefois certains prérequis, comme l'identification des sites de plantation et la sélection des espèces à planter.

Cette étude s'inscrit dans le cadre des efforts de la Fondation David Suzuki visant à lutter contre les CC en améliorant, entre autres, les connaissances et en fournissant aux décideurs des outils ainsi que des indicateurs permettant de mesurer l'atteinte des objectifs d'adaptation (Landry et Hénault-Ethier 2021 ; Landry et al. 2021). Compte tenu que l'élaboration et le succès des mesures d'adaptation des villes aux changements climatiques demeurent peu connus, cette étude vise à évaluer et à optimiser la mise en place d'une mesure spécifique ciblée par la Ville de Montréal, soit la plantation de 500 000 arbres sur son territoire d'ici 2030.

Sur la base de scénarios théoriques, la présente étude modélise et compare les retombées écologiques d'une stratégie de plantation optimisée visant à planter 500 000 nouveaux arbres dans des zones prioritaires afin, d'une part, de répondre à des enjeux d'équité sociale et d'adaptation climatique et d'autre part, d'augmenter la résilience de la forêt urbaine par la diversification fonctionnelle. Construite sur le modèle d'une base méthodologique facile à adapter à différentes contraintes, territoires ou contextes, cette étude propose une approche stratégique pour la gestion des forêts urbaines et répond notamment à trois questions primordiales associées à la mise en œuvre de la plantation d'arbres comme mesure d'adaptation aux CC en territoire municipal :

- Où est-il possible de planter ?
- Où faudrait-il planter en priorité pour répondre à des enjeux d'équité sociale et de résilience face aux changements climatiques ?
- Quelles espèces d'arbres faudrait-il privilégier pour assurer la pérennité de la forêt urbaine et des services écosystémiques?

¹ Les « changements globaux » font référence aux changements du système terrestre à l'échelle planétaire, ce qui englobe les modifications à la circulation atmosphérique, à la circulation océanique, au climat, au cycle du carbone, au cycle de l'azote, au cycle de l'eau et autres cycles, aux modifications de la glace de mer, du niveau de la mer, des réseaux alimentaires, de la diversité biologique, de la pollution, de la santé, etc. Les changements climatiques sont ainsi qu'une des composantes des changements globaux.



Pourquoi les arbres sont-ils nos alliés pour adapter les villes aux changements climatiques?

Une forêt urbaine dense, diversifiée et répartie de manière équitable sur le territoire est essentielle au maintien de milieux de vie sains et agréables, particulièrement lorsque le climat futur est incertain. On vous explique ci-dessous les bienfaits des arbres urbains et de quelle manière ils permettent d'augmenter la résilience et l'équité climatique.

• **Vulnérabilités climatiques**

- **Vagues de chaleur:** Les arbres créent de l'ombre et rafraichissent l'air ambiant en rejetant dans l'air, sous forme de vapeur, l'eau absorbée du sol (un phénomène qui s'appelle l'évapotranspiration). La capacité de refroidissement des arbres en ville est impressionnante et permet même de réduire les coûts de climatisation des bâtiments.
- **Pluies abondantes:** Les arbres retiennent l'eau de pluie dans leur feuillage et augmentent l'infiltration de l'eau dans le sol, permettant ainsi de réduire le ruissellement et donc le volume d'eau qui pourrait s'accumuler dans les rues, faire déborder les égouts ou causer des inondations.
- **Crues:** En améliorant l'infiltration de l'eau dans le sol et en réduisant le ruissellement, les arbres situés le long des berges peuvent réduire les crues et limitent l'érosion en stabilisant le sol. Leur effet d'atténuation des crues est néanmoins réduit si le sol est gelé ou si les arbres n'ont pas encore leurs feuilles.
- **Tempêtes:** Les tempêtes peuvent causer des dommages importants aux arbres (p. ex., branches cassées et déracinement), ce qui augmente le taux de mortalité de la forêt urbaine. Ne pouvant pas atténuer cet aléa, les arbres ne peuvent qu'y résister. Planter des arbres résistants aux tempêtes dans les zones vulnérables assure une pérennité à long terme de la forêt urbaine.
- **Sécheresse :** Lors d'une sécheresse, les arbres peuvent aider à maintenir la couche superficielle du sol plus humide par redistribution hydraulique, mais l'effet reste faible. Bien que les arbres ne puissent pas atténuer cet aléa, certaines espèces d'arbres sont toutefois plus résistantes aux sécheresses que d'autres. Planter des arbres résistants aux sécheresses dans les zones vulnérables assure une pérennité à long terme de la forêt urbaine.

- **Diversité fonctionnelle des arbres :** Différentes espèces d'arbres répondent et s'adaptent différemment aux conditions environnementales. Par exemple, certains arbres tolèrent les pluies abondantes et l'inondation prolongée de leurs racines tandis que d'autres tolèrent les vents violents. Face à l'incertitude du climat futur, une forêt urbaine résistante à différentes perturbations climatiques est une forêt composée d'espèces d'arbres aux fonctions, forces et faiblesses diversifiées (ce qui s'appelle la diversité fonctionnelle).

- **Équité d'accès aux bienfaits des arbres :** La forêt urbaine augmente le bien-être physique et mental de la population (p. ex., diminution des risques de maladies chroniques, du stress et de la dépression). Or dans plusieurs villes canadiennes, ce sont dans les quartiers plus riches abritant une population peu diversifiée qu'on retrouve le plus d'arbres. Favoriser la plantation d'arbres dans les zones moins arborées ou qui abritent une population plus défavorisée augmentera ainsi la distribution et l'accessibilité équitables aux bienfaits des arbres.

1.1 Description de l'approche globale développée

En prenant comme territoire d'étude les 19 arrondissements de la Ville de Montréal (excluant les villes liées), l'étude repose sur l'analyse des retombées écologiques de scénarios optimisés de plantation de 500 000 nouveaux arbres qui ciblent des sites prioritaires de plantation selon les critères socioéconomiques et écologiques et où les espèces sélectionnées optimisent la diversité fonctionnelle de la forêt urbaine. Ces scénarios optimisés sont ensuite comparés à des scénarios aléatoires ou « statu quo » sur la base d'indicateurs afin d'évaluer les bénéfices associés. Pour mener à bien cette comparaison, les quatre étapes présentées à la figure 1 ont été nécessaires. À l'étape 1, nous avons caractérisé la canopée actuelle et la diversité fonctionnelle du territoire montréalais. À l'étape 2, nous avons déterminé, selon les paramètres théoriques définis aux fins de l'exercice, où il serait possible de planter des arbres à l'échelle de ce territoire. À l'étape 3, nous avons identifié plus spécifiquement les zones où la plantation des 500 000 arbres, indépendamment des espèces choisies, serait la plus bénéfique sur le plan socio-écologique pour les quartiers défavorisés, les zones vulnérables aux aléas climatiques et les lieux où la forêt urbaine est la moins dense et diversifiée (c-à-d. la moins résiliente). Ce scénario de plantation « scénario optimisé » a été comparé à un scénario de plantation aléatoire à l'échelle du territoire afin d'évaluer sa robustesse. À l'étape 4, dans les zones de plantation prioritaires identifiées par le scénario optimisé, nous avons ensuite identifié les espèces d'arbres à favoriser pour optimiser la diversité fonctionnelle des arbres et leur résistance à l'aléa climatique dominant. Ce scénario « adaptation et résilience » a été comparé à un scénario « statu quo » selon un ensemble d'indicateurs écologiques et climatiques dans l'optique de comparer les bénéfices associés à une stratégie axée sur la résilience.



Patricia Jekki

ÉTAPE 1 : PORTRAIT ACTUEL

Calculer la canopée actuelle et la diversité fonctionnelle de la forêt urbaine.

ÉTAPE 2 : OÙ PLANTER ?

Identifier les zones potentielles pour la plantation d'arbres et le nombre maximal d'arbres qu'il est possible de planter sur le territoire de la Ville de Montréal en tenant compte de l'environnement bâti, de l'utilisation du sol et de la place disponible pour la croissance des arbres.

ÉTAPE 3 : OÙ PLANTER EN PRIORITÉ ?

SCÉNARIO « OPTIMISÉ »

Objectif : Identifier les zones de plantation de 500 000 arbres qui répondent aux enjeux d'équité sociale et de résilience. Quatre types de critères sont considérés:

- L'indice de canopée
- L'indice canadien de défavorisation multiple
- Les cinq indices de vulnérabilité aux aléas climatiques
- L'indice de diversité fonctionnelle des arbres

Paramétré pour planter 80 % des arbres en zones non minéralisées et 20 % en zones à déminéraliser.

VS

SCÉNARIO « ALÉATOIRE »

L'emplacement des 500 000 arbres est déterminé aléatoirement, sans tenir compte des besoins d'adaptation ou d'équité.

ÉTAPE 4 : QUELLES ESPÈCES PLANTER ?

SCÉNARIO « ADAPTATION ET RÉSILIENCE »

Objectif : Sélectionner les espèces d'arbres à planter (dans les zones identifiées par le scénario optimisé de l'étape 3) afin d'augmenter la diversité fonctionnelle des arbres et favoriser celles qui sont résistantes à l'aléa climatique dominant local.

VS

SCÉNARIO « STATU QUO »

Les espèces d'arbres sont choisies de manière à reproduire la composition actuelle de la forêt urbaine.

Figure 1. Approche globale développée pour la comparaison des scénarios de plantation des 500 000 nouveaux arbres.

L'échelle d'analyse de la méthodologie proposée correspond à des cellules de 250 m x 250 m² (62 500 m²) qui recouvrent ainsi l'ensemble du territoire de la Ville de Montréal (figure 2). Le traitement des données a été réalisé à partir d'un flux de travail automatisé impliquant plusieurs logiciels : le langage de programmation R 4.2.0 (R Core Team 2022), i-Tree Eco version 6.1.36 (Nowak et al. 2018) et QGIS 3.12.22 (QGIS Development Team 2022). La priorisation multicritère, les analyses et les graphiques ont été réalisés via les *packages* informatiques suivants : prioritizr (Hanson et al. 2022), raster (Hijmans et van Etten 2012), sf (Pebesma 2018), tidyverse (Wickham et al. 2019) et ggplot2 (Wickham 2016).

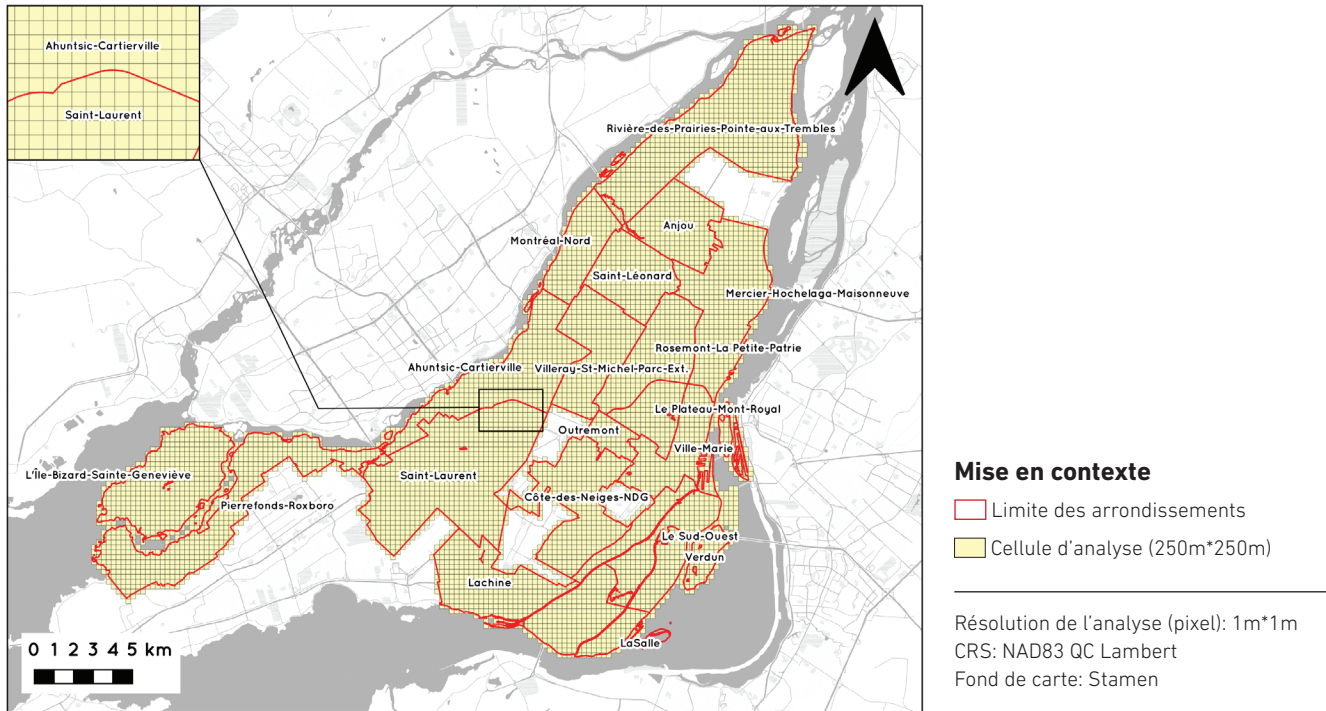


Figure 2. Cartographie du territoire de la Ville de Montréal et de son découpage en cellules d'analyse de 250 m x 250 m.

² Cette échelle d'analyse a été utilisée pour correspondre à celle des couches de vulnérabilités climatiques produites par la Ville de Montréal (voir l'annexe C pour plus de détails).

2. Portrait de la canopée actuelle de Montréal et de sa diversité fonctionnelle

Indice de canopée

En premier lieu, l'indice de canopée des arbres publics et privés de la Ville de Montréal a été calculé. Cette étude repose sur un indice de 21,8 % (7 787 ha) de la superficie totale du territoire, calculé selon les données 2019 de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM 2019)³. De fortes disparités existent toutefois entre les arrondissements comme en témoigne le tableau 1. Un peu moins de la moitié du territoire de L'Île-Bizard-Sainte-Geneviève est ainsi recouvert par la canopée des arbres (47,8 %), alors que cette valeur est sensiblement plus basse pour les arrondissements d'Anjou (11 %), de Saint-Laurent (10,4 %) et de Saint-Léonard (9,7 %).

Tableau 1. Indice de canopée actuel pour chacun des arrondissements de la Ville de Montréal.

Arrondissement	Indice de canopée (%) actuel
L'Île-Bizard-Sainte-Geneviève	47,8
Outremont	37,5
Pierrefonds-Roxboro	36,7
Ville-Marie	26,5
Ahuntsic-Cartierville	26,3
Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce	26,1
Verdun	25,3
Le Plateau-Mont-Royal	23,3
Rosemont-La Petite-Patrie	21,3
Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles	20,5
Le Sud-Ouest	17,5
Montréal-Nord	16,9
Mercier-Hochelaga-Maisonneuve	15,3
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension	14,7
LaSalle	13,8
Lachine	13,1
Anjou	11,0
Saint-Laurent	10,4
Saint-Léonard	9,7
Ville de Montréal	21,8 ³

³ Depuis la réalisation de cette étude, la Ville de Montréal a annoncé qu'elle avait atteint un indice de canopée de 24,3% sur son territoire (Ville de Montréal 2022).

Indice de diversité fonctionnelle

La diversité fonctionnelle des arbres se base sur les caractéristiques biologiques des arbres (plutôt que le recensement du nombre d'espèces différentes), qui renseignent sur leur capacité à répondre à différents facteurs de stress connus, comme la sécheresse, la compaction du sol ou les inondations, ou encore des facteurs inconnus. La diversité fonctionnelle d'une forêt urbaine est ainsi un bon indicateur de sa vulnérabilité. De façon générale, plus les espèces d'un territoire ont des caractéristiques biologiques diversifiées et complémentaires, plus le territoire sera résilient aux perturbations, et ce, malgré l'incertitude liée aux CG.

Une méthode simple d'application de la diversité fonctionnelle consiste à regrouper les espèces d'arbres selon la similitude de leurs traits fonctionnels, sous la forme de groupes dits groupes fonctionnels, selon une approche adaptée de Paquette et al. (2021) et Aquilué et al. (2021). Au Québec, les principales espèces d'arbres typiques des milieux urbains (indigènes et ornementales) sont réparties en 9 sous-groupes, au sein desquels les espèces ont des caractéristiques biologiques (et donc des vulnérabilités) semblables. Par exemple, les érables (groupe 2AB) sont résistants aux pluies et aux crues, mais vulnérables aux épisodes de sécheresses et de vents violents, tandis que les chênes (groupe 4A) ont une plus grande tolérance aux sécheresses. Tous les détails sur les groupes fonctionnels et l'évaluation de la diversité fonctionnelle sont fournis à l'annexe A.

Basé sur l'inventaire des arbres publics de la Ville de Montréal⁴, l'indice de diversité fonctionnelle actuel à l'échelle de la Ville de Montréal est évalué à 5,9 sur 9 (9 représentant le cas idéal où tous les groupes sont présents et représentés équitablement). À l'échelle plus fine des cellules d'analyse, l'indice de diversité fonctionnelle moyen pour le territoire montréalais est pourtant évalué à 3,7 sur 9⁵. Cette différence demeure normale puisque plus l'échelle d'analyse est large, plus le nombre d'arbres analysés augmente et donc plus la probabilité d'avoir des espèces diversifiées est grande.



Ryunosuke Kikuno

⁴ Inventaire consulté en octobre 2021 et recensant un total de 318 267 arbres publics. Le total des arbres considéré dans le cadre de ces analyses (284 497 arbres) exclut 33 770 données de l'inventaire pour lesquelles certaines informations étaient manquantes (appartenance à un groupe fonctionnel ou géolocalisation).

⁵ Pour les arrondissements Anjou, Île-Bizard-Sainte-Geneviève, Lachine, Montréal-Nord, Outremont et certains secteurs de Pierrefonds-Roxboro, Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles, Saint-Laurent et Ville-Marie, les données identifiant les arbres n'étant pas disponibles, nous nous sommes basés sur l'indice de diversité fonctionnelle moyen pour les cellules d'analyse, soit à 3,7.

3. Identification des zones potentielles pour la plantation d'arbres

3.1 Approche développée⁶

Les zones potentielles pour la plantation correspondent aux lieux où il est possible de planter des arbres. Ces zones potentielles de plantation, et leur superficie respective, ont été identifiées sur l'ensemble du territoire de la Ville de Montréal. Elles prennent en compte les terrains publics et privés de la ville et se distinguent en zones de plantation sans contrainte, dites « zones non minéralisées » (p. ex., parcs, surfaces gazonnées, terrains vacants où aucun arbre n'est actuellement présent), et en zones à déminéraliser, dites « zones minéralisées » (p. ex., stationnements et trottoirs où aucun arbre n'est actuellement présent). Les superficies minéralisées considérées comme potentielles pour la plantation d'arbres correspondent à l'ensemble de la superficie des trottoirs qui n'est pas déjà recouvert par la cime d'arbres et 10 % de la superficie totale des stationnements afin de maintenir un espace pour les automobiles. Cette valeur de 10 % demeure conservatrice considérant que le Conseil régional de l'environnement de Montréal suggère la mise en place de stationnements écoresponsables où la canopée mature serait égale à 40 % de la superficie totale du stationnement⁷.

Le calcul de la superficie totale associée aux zones potentielles de plantation, autrement dit la superficie maximale potentielle de plantation, a par ailleurs permis de calculer le nombre maximum d'arbres qui pourraient être plantés sur le territoire municipal. Le nombre d'arbres à planter pour une superficie d'un hectare a été défini pour les zones non minéralisées et minéralisées. En zones non minéralisées, il est recommandé de planter 125 arbres par hectare afin de permettre le plein déploiement de la couronne des arbres en milieu ouvert (Pretzsch et al. 2015) et ainsi atteindre une fermeture de la canopée lorsque les arbres sont à maturité. En zones minéralisées, la densité choisie dans le cadre de cette étude était supérieure, de l'ordre de 400 arbres par hectare, car les coûts de déminéralisation dans l'optique de planter des arbres sont très élevés. Bien que la justification de cette densité soit avant tout économique, une telle approche permet toutefois d'accélérer la fermeture de la canopée. Il est d'ailleurs important de souligner que le choix de densité des arbres à planter par hectare est un facteur qui influence grandement le nombre total d'arbres pouvant être plantés sur l'ensemble du territoire municipal.

3.2 Zones potentielles de plantation à Montréal

L'analyse réalisée à cette étape a permis d'identifier toutes les zones potentielles de plantation répondant aux critères utilisés et la figure 3 illustre le type de résultats obtenus (sous forme de couche géomatique) pour les zones localisées en milieux non minéralisés. En zones minéralisées, notre méthodologie a estimé la proportion des superficies pouvant être déminéralisées pour permettre la plantation d'arbres, sans toutefois créer une couche géomatique associée.

⁶ La méthodologie détaillée pour cette étape est fournie à l'annexe B.

⁷ <https://stationnementecoresponsable.com/la-plantation-darbres/>



Critères de sélection des zones potentielles pour la plantation

Zones retenues

- Terrains publics et privés sur le territoire de la Ville de Montréal
- Zones non-minéralisées (p. ex., parcs, surfaces gazonnées, terrains vacants où aucun arbre n'est actuellement présent)
- Zones à déminéraliser, incluant: (1) la superficie des trottoirs qui n'est pas déjà recouverte par la cime d'arbres et (2) 10 % de la superficie totale des stationnements

Zones exclues

- Zones non convenables à la plantation (p. ex., les milieux agricoles, les milieux humides, les terrains de sport, les jardins communautaires, les golfs, les routes et autoroutes, les cimetières, les prisons et l'aéroport)
- Zones à moins de 3 mètres des jeunes arbres ou à moins de 2 mètres des bâtiments
- Zones à moins de 8 mètres des intersections routières ou à moins de 0,8 mètre des routes
- Zones de moins de 80 m² (l'espace disponible ne permettant pas aux arbres de croître pleinement)

La méthodologie détaillée est décrite à l'annexe B.



Figure 3. Illustration de l'identification des zones potentielles de plantation dans les arrondissements de Saint-Léonard (1) et Rosemont-La-Petite-Patrie (2). Les images du haut permettent de localiser le territoire alors que les images du bas présentent la couche géomatique regroupant les zones non minéralisées où la plantation d'arbres est possible selon les critères utilisés.

Selon l'approche développée et les paramètres théoriques définis, la superficie maximale potentielle de plantation pour de nouveaux arbres représenterait 4 662,3 ha sur le territoire montréalais, dont 4 024,5 ha situés en zones non minéralisées et 637,8 ha en zones minéralisées (tableau 2). Si l'ensemble de cette superficie était recouvert par la canopée des arbres (de façon concrète, il faudrait donc considérer que les arbres plantés survivent et deviennent matures), et toujours selon les paramètres définis, l'indice de canopée de la Ville pourrait éventuellement atteindre 27,76 % de la superficie totale du territoire.

Tableau 2. Répartition de la superficie maximale potentielle de plantation sur le territoire de la Ville de Montréal, selon la localisation des sites en zone non minéralisée ou minéralisée et de tenure publique ou privée.

	Tenure publique	Tenure privée	Total
Zone non minéralisée (ha)	1 186,6	2 837,9	4 024,5
Zone minéralisée (ha)	624,5	13,3	637,8
Total (ha)	1 811,1	2 851,2	4 662,3

La superficie totale offerte à la plantation en territoire public s'élèverait à 1 811,1 ha et à 2 851,2 ha en territoire privé (tableau 2). Ainsi, le secteur privé constitue un acteur important pour contribuer à l'augmentation de l'indice de canopée de la ville et ce potentiel fait valoir le besoin de règlements, d'incitatifs et de programmes municipaux encourageant la plantation sur les terrains privés. Cette idée est renforcée par le fait que plus du tiers de la superficie disponible à la plantation en zone non minéralisée se localise dans l'emprise de terrains résidentiels (figure 4). Les bénéfices écologiques et économiques associés à de nouveaux arbres plantés bénéficieront en premier lieu aux résidentes et résidents.

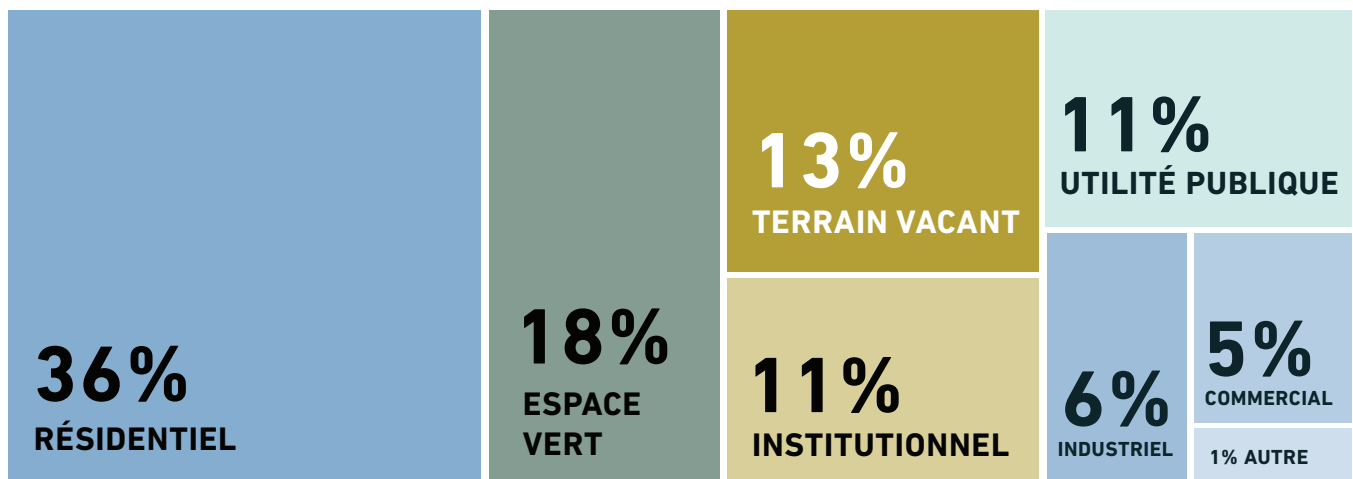


Figure 4. Proportion (en %) des superficies disponibles à la plantation en zones non minéralisées selon le type d'utilisation du territoire de Montréal (CMM 2020).

3.3 Nombre potentiel maximal d'arbres

L'approche développée pour calculer la superficie maximale potentielle de plantation permet par ailleurs d'évaluer le nombre maximum d'arbres que pourrait accueillir le territoire de Montréal avec des densités de 125 arbres/ha en zones non minéralisées et 400 arbres/ha en zones minéralisées. Il serait ainsi théoriquement possible de planter 758 162 nouveaux arbres dans la zone d'étude, dont 398 090 arbres en territoire public et 360 072 en territoire privé (tableau 3). Tel que décrit dans la méthodologie détaillée de l'Annexe B, certains paramètres, comme la présence de câbles souterrains, de pylônes électriques ou de bornes-fontaines, non pas été pris en compte dans l'analyse et pourraient réduire le nombre potentiel maximal d'arbres à planter. À titre de comparaison, la Ville de Montréal estime à 500 000 le nombre maximal d'arbres qu'elle peut planter sur son territoire, en grande partie à cause de la présence d'infrastructures souterraines et de surface⁸.

Tableau 3. Répartition du nombre maximal d'arbres pouvant être plantés sur le territoire de la Ville de Montréal, selon la localisation des sites en zone non minéralisée ou minéralisée et de tenure publique ou privée.

	Tenure publique	Tenure privée	Total
Zone non minéralisée (nb. arbres)	148 327	354 738	503 065
Zone minéralisée (nb. arbres)	249 763	5 334	255 097
Total (nb. arbres)	398 090	360 072	758 162

Au niveau des arrondissements, puisque la superficie maximale potentielle de plantation varie, il en va de même pour le nombre d'arbres à planter par arrondissement et certains se démarquent par leur propension à pouvoir accueillir davantage d'arbres (tableau 4).



⁸ Selon la Division de la forêt urbaine de la Ville de Montréal.

Tableau 4. Répartition du nombre maximal d'arbres pouvant être plantés pour chacun des arrondissements de la Ville de Montréal et augmentation potentielle maximale de leur indice de canopée.

Arrondissement	Nombre d'arbres maximal théorique			Canopée théorique maximale (%) – [Augmentation (%)] ⁹
	Zone minéralisée	Zone non minéralisée	Total	
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	24 185	110 454	134 639	29,9 [9,4]
Saint-Léonard	12 315	23 441	35 756	17,5 [7,8]
Montréal-Nord	11 509	15 710	27 219	24,3 [7,4]
Verdun	7 751	15 252	23 003	32,5 [7,1]
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	17 527	21 829	39 356	21,8 [7,1]
Anjou	10 003	20 872	30 875	17,6 [6,6]
Rosemont–La Petite-Patrie	16 116	18 759	34 875	27,8 [6,5]
LaSalle	12 737	22 691	35 428	20,2 [6,5]
Mercier-Hochelaga-Maisonneuve	20 592	34 135	54 727	21,7 [6,4]
Ahuntsic-Cartierville	19 956	30 254	50 210	32,5 [6,2]
Le Sud-Ouest	14 698	16 611	31 309	23,4 [5,9]
Lachine	10 841	22 671	33 512	18,6 [5,6]
Saint-Laurent	22 303	57 404	79 707	15,9 [5,5]
Ville-Marie	18 333	10 050	28 383	31,9 [5,4]
Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce	14 933	19 501	34 434	30,8 [4,8]
Le Plateau-Mont-Royal	10 311	2 878	13 189	28,2 [4,8]
Pierrefonds-Roxboro	6 845	33 739	40 584	41,1 [4,4]
L'Île-Bizard-Sainte-Geneviève	1 708	25 332	27 040	51,2 [3,4]
Outremont	2 434	1 482	3 916	40,5 [3,1]
Ville de Montréal	255 097	503 065	758 162	27,8 [6,0]

⁹ Pourcentage en valeur absolue

Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles serait ainsi l'arrondissement qui pourrait théoriquement accueillir le plus d'arbres (134 639 arbres), au contraire d'Outremont qui en accueillerait le moins (3 916 arbres). On note aussi que malgré le contexte très minéralisé de l'arrondissement Ville-Marie, un certain nombre d'arbres pourrait être planté à l'intérieur des limites administratives du quartier grâce à la présence d'une partie du parc du Mont-Royal, mais aussi grâce aux nombreux stationnements à ciel ouvert susceptibles d'accueillir des arbres. La figure 5 illustre le nombre d'arbres pouvant être plantés pour chaque cellule d'analyse (250 m x 250 m) du territoire de la Ville.

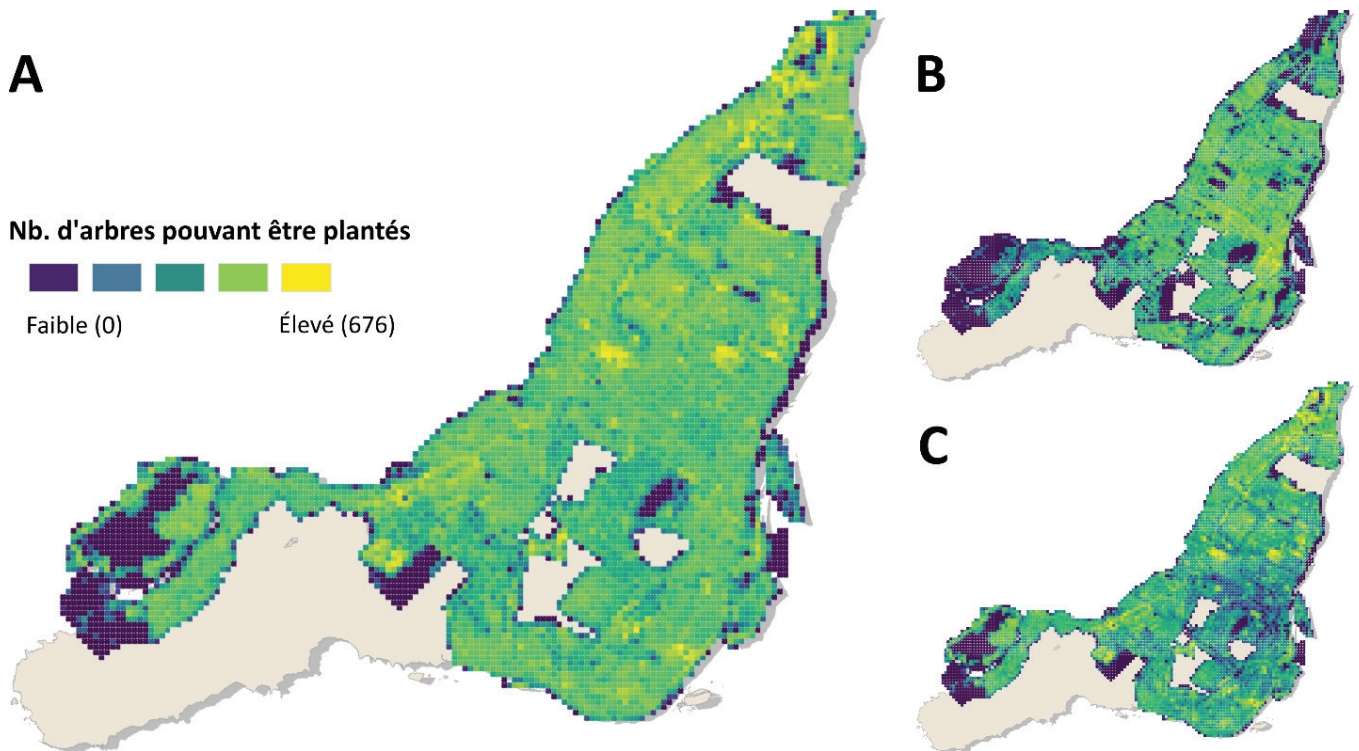


Figure 5. Cartographie du nombre d'arbres maximum potentiel pouvant être plantés par cellule d'analyse (250 m x 250 m) sur le territoire de la Ville de Montréal, A) en zone non minéralisée et minéralisée; B) en zone minéralisée seulement, C) en zone non minéralisée seulement.

4. Identification des zones à prioriser pour la plantation d'arbres selon des critères d'équité sociale et de résilience face aux changements globaux

4.1 Approche développée

Après avoir calculé la superficie maximale potentielle de plantation et défini la densité d'arbres à planter, l'étape 3 visait à identifier plus spécifiquement où les arbres devraient être plantés en priorité pour répondre à des enjeux d'équité sociale et de résilience face aux changements globaux (CG), puisque la Ville s'est engagée à planter 500 000 arbres sur son territoire et non à combler tous les espaces disponibles avec des arbres (figure 1).

Pour ce faire, nous avons utilisé un algorithme de priorisation (Hanson et al. 2022) pour développer un scénario de plantation optimisé. Indépendamment des espèces à planter, ce scénario se base sur quatre types de critères choisis pour répondre à des enjeux d'équité sociale et de résilience face aux CG (la description et les références pour chaque critère sont présentées dans le tableau 5) :

- L'indice de canopée – équité sociale pour l'accès aux espaces verts ;
- L'indice canadien de défavorisation multiple (ICDM) – équité socio-économique ;
- Les cinq indices de vulnérabilité aux aléas climatiques – résilience du territoire face aux CC :
 - Vagues de chaleur
 - Sécheresses
 - Pluies abondantes
 - Crues
 - Tempêtes
- L'indice de diversité fonctionnelle des arbres – résilience des arbres face aux CG.

L'optimisation cible ainsi les zones de plantation de sorte que les bénéfices socio-écologiques des arbres profitent, par exemple, aux quartiers les plus défavorisés et aux zones où la forêt urbaine est la moins diversifiée (c.-à-d. la moins résiliente).

Chacun des huit critères retenus a reçu un poids équivalent dans la priorisation pour ne pas déséquilibrer l'ensemble et, après consultation avec la Ville¹⁰, l'algorithme a été paramétré pour planter 80 % des arbres en zones non minéralisées et 20 % en zones à déminéraliser (ces paramètres pourraient être adaptés pour répondre à un autre contexte d'étude).

⁹ Bureau de la transition écologique et de la résilience et Division Forêt urbaine à la Ville de Montréal.

Pour évaluer et comparer l'efficacité de la stratégie de plantation des deux scénarios, c.-à-d., si les sites de plantation identifiés par le modèle répondent aux besoins selon les critères retenus, nous avons calculé pour chacun des critères le ratio entre la superficie de plantation obtenue et la superficie totale identifiée par chaque critère. Ce ratio (ou score) fournit une valeur comprise entre 0 et 1, où 0 signifie qu'aucune superficie de plantation est située dans la zone jugée prioritaire par le critère et 1 signifie que toute la superficie identifiée par le critère serait recouverte d'arbre. À titre d'exemple, le score du critère de vulnérabilité aux crues a été calculé en fonction de la superficie totale disponible à la plantation située dans une zone à risque de subir des crues. Un score de 1 pour ce critère signifie que toute la superficie à risque est utilisée pour planter de nouveaux arbres.

Basée sur ces différents scores, l'analyse de priorisation identifie les cellules d'analyse (250 m x 250 m) pour lesquelles la plantation est prioritaire. Plus précisément, les résultats indiquent le nombre d'arbres à planter pour chaque cellule d'analyse du territoire dans l'optique d'optimiser les critères utilisés.

Tableau 5. Critères socio-écologiques considérés dans l'analyse de priorisation des zones de plantation à l'échelle de la Ville de Montréal.

Critères	Description
Indice de canopée	Fait référence à la superficie au sol (en hectare) occupée par la couronne des arbres publics et privés de la Ville de Montréal de plus de 3 m de hauteur. Les données sont calculées pour chaque cellule de 250 m x 250 m à partir de la couche matricielle de canopée produite par la Communauté métropolitaine de Montréal (2019) ¹¹ .
Indice canadien de défavorisation multiple (ICDM)	Mesure des conditions socio-économiques de la population selon quatre dimensions : instabilité résidentielle, dépendance économique, composition ethnoculturelle et vulnérabilité situationnelle. Les valeurs des indicateurs se basent sur le recensement de la population de 2016 (Statistique Canada 2016) et ont été adaptées à l'échelle d'analyse de 250 m x 250 m. Les quatre dimensions de l'ICDM ont été regroupées pour former un indice composite unique.
Indice de vulnérabilité aux vagues de chaleur	Données issues de l'analyse de vulnérabilité élaborée dans le cadre du Plan d'adaptation aux CC de l'agglomération de Montréal 2015-2020 (Ville de Montréal 2017) et calculées selon une grille d'analyse composée de cellules de 250 m x 250 m.
Indice de vulnérabilité aux sécheresses	
Indice de vulnérabilité aux pluies abondantes	
Indice de vulnérabilité aux crues	
Indice de vulnérabilité aux tempêtes	
Indice de diversité fonctionnelle des arbres	Diversité des caractéristiques biologiques des arbres basée sur les travaux de Paquette et al. (2021) et Aquilué et al. (2021) et sur les 9 sous-groupes fonctionnels. L'indice de diversité fonctionnelle a été calculé à l'échelle d'analyse de 250 m x 250 m selon l'inventaire des arbres publics de la Ville de Montréal (https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/arbres). La méthodologie détaillée est présentée à l'annexe A.

¹¹ © Communauté métropolitaine de Montréal, 2011-2019

Afin d'évaluer les bénéfices associés à une approche misant sur l'équité et l'adaptation aux CC, le scénario de plantation optimisé a été comparé à un modèle nul, soit un scénario de plantation aléatoire (figure 1), où la plantation se base donc toujours sur les zones potentielles de plantation, mais sans aucune priorisation. Le seul critère était de planter 80 % des arbres en zones non minéralisées et 20 % en zones à déminéraliser en fonction de l'espace disponible pour la plantation. Nous avons réalisé 40 répétitions de ce scénario aléatoire afin d'obtenir des résultats fiables et évaluer la variance des résultats.

Les deux scénarios de plantation ont été comparés selon chacun des critères socio-écologiques décrits au tableau 5.

4.2 Scénario de plantation optimisé

Chacune des cellules d'analyse a reçu un score pour l'ensemble des critères socio-écologiques retenus, soit l'indice de canopée, l'ICDM, chacun des cinq indices de vulnérabilité aux aléas climatiques et l'indice de diversité fonctionnelle (figure 6).

Sur la base de la superficie potentielle de plantation et de ces critères, les résultats issus des analyses de priorisation identifient les secteurs prioritaires pour la plantation des 500 000 nouveaux arbres selon l'ensemble des critères considérés dans l'optique d'optimiser à la fois l'équité sociale et la résilience face aux CC (figure 7).

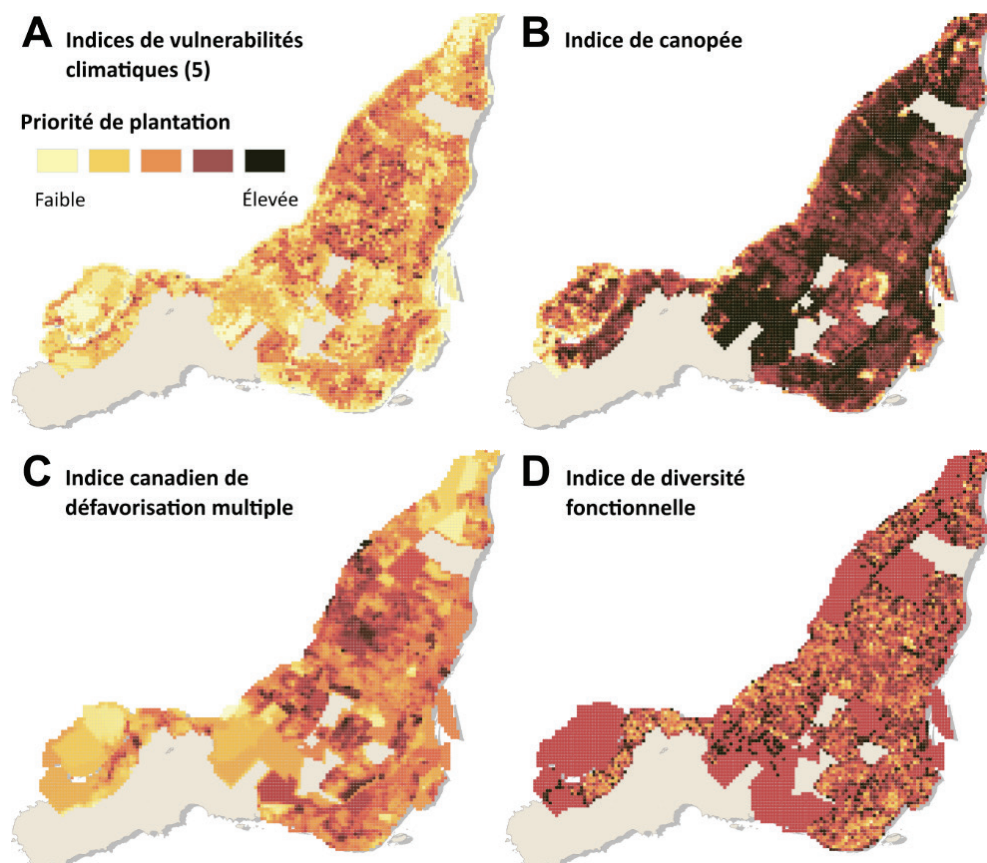


Figure 6. Illustration des scores obtenus pour chaque type d'indices utilisés dans le scénario de plantation optimisé A : Superposition des 5 indices de vulnérabilités aux aléas climatiques (voir annexe C, figure C1 pour le détail pour chaque aléa climatique) ; B : Indice de canopée ; C : Indice canadien de défavorisation multiple ; D : Indice de diversité fonctionnelle. Les valeurs plus foncées indiquent les sites les plus prioritaires pour la plantation selon chacun des indices (p. ex., priorisation des sites où l'indice de canopée est le plus faible). La superposition des indices de vulnérabilités a été réalisée simplement à des fins cartographiques, les indices ont été considérés indépendamment dans les analyses.

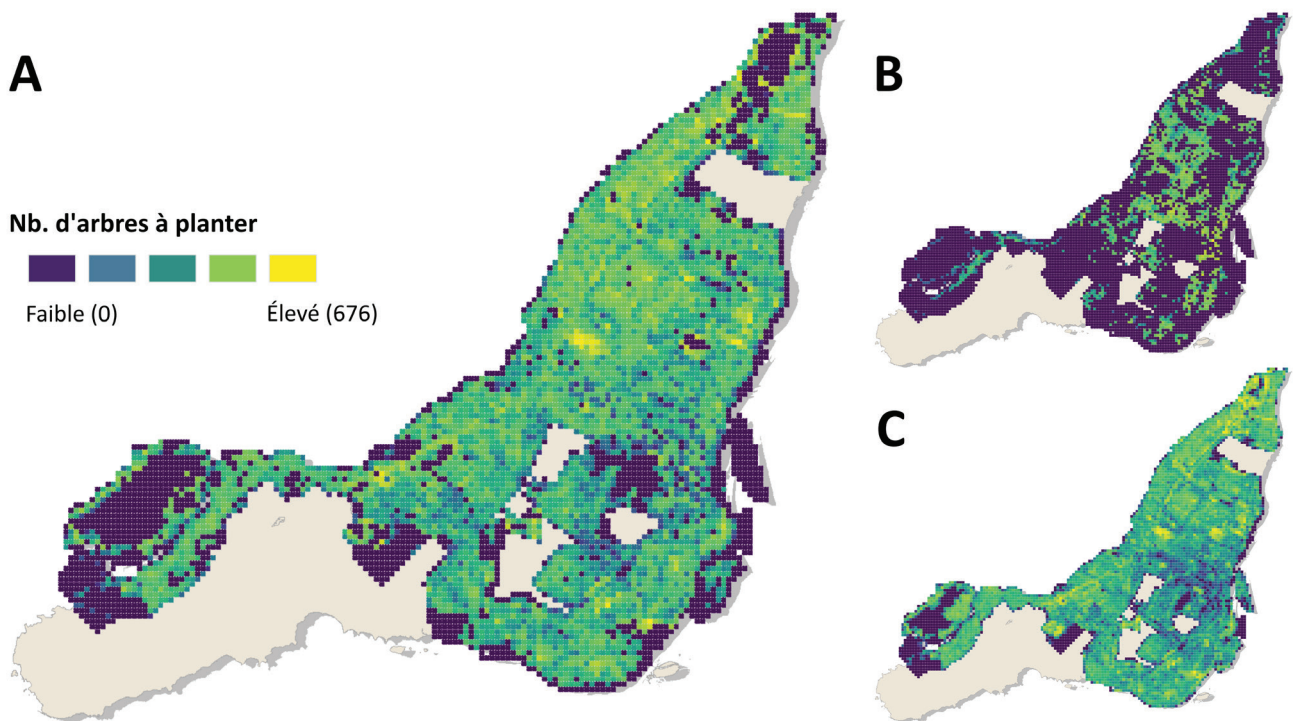


Figure 7. Cartographie des zones à prioriser pour la plantation et du nombre d'arbres à planter par cellule d'analyse (250 m x 250 m) sur le territoire de la Ville de Montréal selon le scénario de plantation optimisé, A) en zone non minéralisée et minéralisée ; B) en zone minéralisée seulement, C) en zone non minéralisée seulement. La couche géomatique montrant le nombre d'arbres à planter en priorité (A) est disponible sur le [site de la Fondation David Suzuki](#).

Ainsi, une telle approche permet d'orienter la planification selon les enjeux les plus importants pour un secteur en particulier, et, notamment, de baser les décisions sur des critères aussi bien écologiques que socioéconomiques, afin d'optimiser les bénéfices de la plantation de façon durable. Le tableau 6 détaille pour sa part le nombre d'arbres à planter en zones minéralisées et non minéralisées, pour chaque arrondissement (par cumul des cellules d'analyse qui composent chaque territoire), selon le scénario de plantation optimisé. Le tableau inclut également la canopée théorique et l'augmentation par rapport à la canopée actuelle dans chaque arrondissement.

Une telle approche permet d'orienter la planification selon les enjeux les plus importants pour un secteur en particulier, et, notamment, de baser les décisions sur des critères aussi bien écologiques que socioéconomiques, afin d'optimiser les bénéfices de la plantation de façon durable.

Tableau 6. Nombre d'arbres à planter par arrondissement du territoire de la Ville de Montréal d'ici à 2030, selon un scénario de plantation optimisé visant l'équité et la résilience face aux CC. Les arrondissements sont présentés par ordre décroissant d'arbres à planter.

Scénario d'équité et de résilience climatique					
Arrondissement	Nombre d'arbres à planter			Canopée théorique (%)	Augmentation théorique de la canopée (%) ¹²
	Zone minéralisée	Zone non minéralisée	Total		
Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles	7 336	76 542	83 878	26,4	5,9
Saint-Laurent	3 678	46 236	49 914	13,8	3,4
Mercier-Hochelaga-Maisonneuve	8 040	31 717	39 757	20,0	4,7
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension	13 024	21 656	34 680	21,0	6,3
Ahuntsic-Cartierville	7 263	26 235	33 498	30,5	4,2
Saint-Léonard	9 098	23 094	32 192	16,8	7,1
Pierrefonds-Roxboro	2 452	26 871	29 323	39,9	3,2
Montréal-Nord	8 382	15 649	24 031	23,5	6,6
LaSalle	3 574	19 986	23 560	18,0	4,2
Le Sud-Ouest	5 786	15 506	21 292	21,6	4,1
Anjou	3 670	17 575	21 245	15,6	4,6
Rosemont-La Petite-Patrie	6 635	14 304	20 939	25,2	3,9
Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce	3 882	16 408	20 290	28,9	2,8
Lachine	1 650	16 528	18 178	16,1	3,0
L'Île-Bizard-Sainte-Geneviève	617	14 558	15 175	49,7	1,9
Ville-Marie	6 885	5 038	11 923	28,8	2,3
Verdun	3 091	8 440	11 531	28,9	3,6
Le Plateau-Mont-Royal	4 705	2 788	7 493	26,1	2,8
Outremont	232	869	1 101	38,3	0,8
Ville de Montréal	100 000	400 000	500 000	25,0	3,2

Note: Le pourcentage théorique de recouvrement de la canopée (canopée théorique) à l'issue de la plantation tient compte de la superficie terrestre de chaque arrondissement et suppose que tous les arbres vont survivre à maturité, avec un recouvrement de la canopée médiane après 30 ans égal à 29,7 m².

¹² Pourcentage en valeur absolue

On constate que le nombre d'arbres à planter varie grandement d'un arrondissement à l'autre. Selon notre analyse de priorisation, l'arrondissement où il faudrait planter le plus d'arbres serait Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles (83 878 arbres) tandis que l'arrondissement d'Outremont serait celui où il faudrait en planter le moins (1 101 arbres). Ceci s'explique d'abord par le fait que l'arrondissement de Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles est bien plus grand qu'Outremont, l'espace disponible pour la plantation y est donc supérieur (tableau 4). Par ailleurs, compte tenu des paramètres utilisés dans le cadre de cette étude (80 % en zones non minéralisées), la localisation des zones potentielles de plantation influence beaucoup la priorisation.

Le second facteur qui explique l'emplacement des arbres à planter est attribué au cumul des scores reçus pour chaque critère. Par exemple, un emplacement caractérisé par un fort indice de défavorisation, un faible indice de canopée et un faible indice de diversité fonctionnelle sera ciblé en priorité par l'algorithme. Nos résultats montrent d'ailleurs que ces critères sont liés entre eux, comme c'est le cas pour l'arrondissement de Saint-Laurent qui affiche un fort indice de défavorisation mais un faible indice de canopée. Les études de Nesbitt et al. (2019) et Landry et al. (2020) corroborent ces résultats puisqu'elles ont montré que les quartiers composés de minorités ethniques et de ménages à faibles revenus ont généralement une canopée plus faible et ces quartiers sont davantage exposés aux effets néfastes de l'environnement sur la santé, comme la chaleur extrême et la mauvaise qualité de l'air.

Nous observons par ailleurs qu'il existe de petits secteurs pouvant accueillir un nombre élevé d'arbres, comme c'est le cas au nord du quartier de Viauville dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve (figure 8-1), à l'est de l'autoroute 13 au niveau du boulevard Gouin (arrondissement Ahuntsic-Cartierville) (figure 8-2) ou encore dans le parc Frédéric-Back (arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension) (figure 8-3). Précisons que dans le cas du parc Frédéric-Back, ancien lieu d'enfouissement de matières résiduelles, la ville a déjà commencé à restaurer le site¹³.

En plantant 500 000 nouveaux arbres, et selon les paramètres définis, le pourcentage de canopée de la Ville (excluant les villes liées) pourrait augmenter de plus de 3% en moyenne d'ici une trentaine d'année, pour une superficie totale de recouvrement au sol de 9 282 ha. Ces valeurs supposent toutefois que le recouvrement de la canopée médiane des arbres après 30 ans serait égal à 29,7 m²/arbres (selon les données issues d'i-Tree Forecast) et que tous les arbres survivent.



Jamshed Khedri

¹² <https://montreal.ca/articles/le-parc-frederic-back-une-metamorphose-unique-18997>

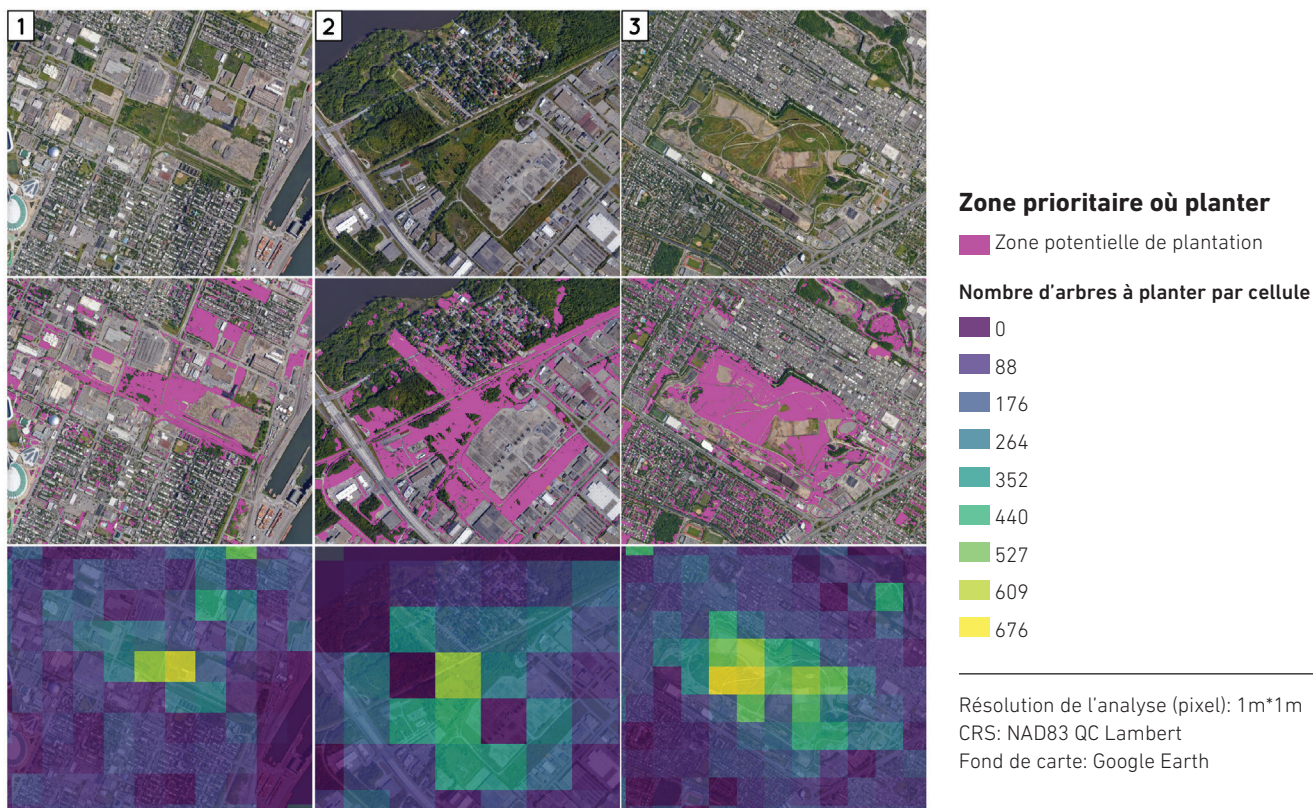


Figure 8. Agrandissements de trois secteurs de la Ville de Montréal jugés prioritaires pour la plantation d'arbres selon les critères socio-écologiques retenus : 1) nord du quartier de Viauville dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, 2) boulevard Gouin dans l'arrondissement Ahuntsic-Cartierville, 3) parc Frédéric-Back dans l'arrondissement Villeray–Saint-Michel-Parc-Extension. De haut en bas, les images présentent le secteur agrandi, les zones potentielles de plantation en zone non minéralisée et le nombre d'arbres à y planter par cellule d'analyse (250 m x 250 m) selon les critères socio-écologiques en zones non minéralisée et minéralisée.

4.3 Comparaison du scénario de plantation optimisé avec le scénario aléatoire

Afin d'évaluer les bénéfices associés à une approche misant sur l'équité et l'adaptation aux CC dans le choix des zones de plantation, le scénario de plantation optimisé a été comparé au scénario de plantation aléatoire selon les critères socio-écologiques retenus (figure 9). Les résultats distinguant les arbres plantés en zones non minéralisées (80 %) et ceux plantés en zones minéralisées (20 %) sont présentés en annexe D.

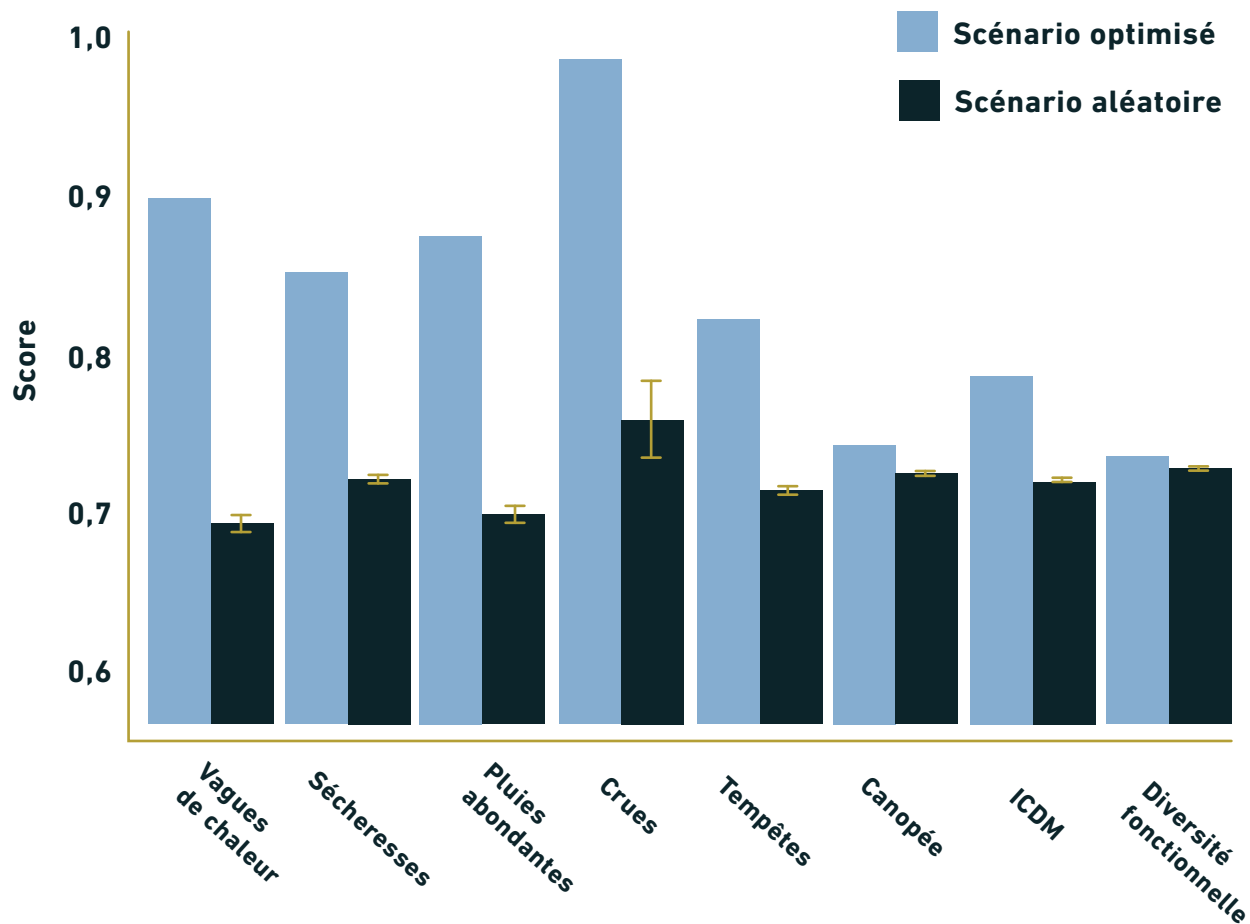


Figure 9. Comparaison du scénario de plantation optimisé et du scénario de plantation aléatoire sur la base des scores obtenus pour chacun des critères socioéconomiques et écologiques. Le score, de 0 à 1, reflète l'efficacité de la stratégie de plantation, c.-à-d., là où des arbres devraient être plantés selon chaque critère.

Ainsi, en identifiant des zones de plantation de façon prioritaire et stratégique, il est possible de répondre à un grand ensemble de critères (dans le cas présent, la totalité), contrairement à des interventions de plantation aléatoires. Il est par ailleurs intéressant de se pencher sur la variabilité des différences entre les deux scénarios, souvent associée aux superficies (ou nombre de cellules d'analyse) considérées pour chaque critère. Par exemple, comme les superficies à risque de subir des crues sont relativement faibles sur le territoire, une approche optimisée ciblera facilement la plupart de ces zones pour la plantation de nouveaux arbres et aura donc une amélioration marquée sur cet enjeu climatique. Par contre, la probabilité est faible qu'un scénario aléatoire cible ces zones spécifiques à l'échelle du territoire montréalais compte tenu de leur faible proportion. À l'inverse, compte tenu des nombreuses superficies où l'indice de canopée demeure faible, le scénario de plantation aléatoire conduit à une augmentation proche (bien que plus faible) du scénario optimisé.

5. Sélectionner les espèces d'arbres à planter pour augmenter la résilience

5.1 Approche développée

En se basant sur les zones de plantation issues du scénario de plantation optimisé (zones prioritaires), l'ultime étape de l'analyse consistait à comparer l'impact écologique de la sélection des espèces à planter selon deux scénarios : un scénario « adaptation et résilience » et un scénario « statu quo ».

Pour le scénario « adaptation et résilience », la sélection des espèces a reposé sur un deuxième algorithme d'optimisation et visait d'abord à augmenter la diversité fonctionnelle des arbres à l'échelle de chacune des cellules d'analyse du territoire puis ensuite à favoriser des espèces résistantes à l'aléa climatique dominant local (vagues de chaleur, sécheresses, pluies abondantes, crues, tempêtes) parmi la liste des arbres retenus pour augmenter la diversité fonctionnelle. L'aléa climatique considéré comme dominant a été identifié à l'échelle de la cellule d'analyse suivant le niveau de vulnérabilité de chaque aléa (non significatif, mineur, modéré, élevé, majeur ; voir annexe C pour plus de détails). Autrement dit, ce scénario favorise la diversification d'espèces adaptées aux contraintes climatiques locales.

Dans le cas du scénario « statu quo », les espèces ont été sélectionnées pour être représentatives des genres déjà présents sur le territoire montréalais, en respectant leur abondance relative à l'échelle de la ville (tableau 7). Ce scénario ne visait donc pas à augmenter la diversité fonctionnelle du territoire, ni optimiser le choix des espèces à planter en fonction de leur capacité à résister aux aléas climatiques locaux spécifiques aux différents quartiers montréalais. En d'autres termes, si la proportion des genres *Picea* (épinette) et *Quercus* (chêne) est actuellement de 4,4 % et 3,7 % respectivement, ces proportions ont été conservées dans le scénario « statu quo ». De même pour le genre *Acer* (érable) qui représente environ un tiers des arbres présents selon l'inventaire de la Ville de Montréal.



Tableau 7. Synthèse des 10 genres d'arbres les plus abondants selon l'inventaire de la Ville de Montréal (2021) et figurant aussi dans la liste des espèces d'arbres potentielles dans les deux scénarios de plantation (annexe E). Le tableau indique pour chaque genre leur abondance et leur pourcentage relatif par rapport au nombre total d'arbres présents dans l'inventaire trié de la Ville de Montréal.

Genre	Abondance	Pourcentage
Acer (érable)	96 769	34,0 %
Tilia (tilleul)	21 548	7,6 %
Gleditsia (févier)	19 901	7,0 %
Ulmus (orme)	17 635	6,2 %
Picea (épinette)	12 378	4,4 %
Quercus (chêne)	10 474	3,7 %
Celtis (micocoulier)	9 739	3,4 %
Gymnocladus (chicot)	6 913	2,4 %
Malus (pommier)	6 896	2,4 %
Syringa (lilas)	6 405	2,3 %
Autres	75 839	26,7 %
Total ¹⁴	284 497	100,0 %

Pour les deux scénarios, les espèces ont été choisies parmi une liste d'espèces¹⁵ issues en partie d'une précédente étude réalisée à Montréal par Habitat (2019), et qui inclut les espèces nouvellement plantées par la Ville, à laquelle quelques espèces ont été ajoutées afin d'avoir une meilleure représentativité de certains groupes fonctionnels. Au final, 82 espèces d'arbres ont été retenues pour les analyses (annexe E). Les scénarios ont été élaborés sur la base de 40 répétitions de la sélection des espèces d'arbres par cellule d'analyse, afin d'obtenir des résultats fiables et robustes, captant la variabilité possible notamment selon les contraintes locales du territoire.

En résumé, les scénarios élaborés visaient tous les deux à planter 500 000 nouveaux arbres sur le territoire montréalais, aux mêmes emplacements jugés prioritaires, mais se distinguent sur les espèces sélectionnées. L'annexe F fournit plus de détails sur la façon dont les espèces ont été sélectionnées selon leur résistance et leur vulnérabilité face aux aléas climatiques et selon le scénario.

Les deux scénarios ont ensuite été comparés à l'aide d'indicateurs en termes de résistance face aux aléas climatiques, de services écosystémiques et de diversité fonctionnelle, à l'échelle de la Ville (des 500 000 nouveaux arbres) (tableau 8). Le choix des indicateurs utilisés est basé sur Landry et Hénault-Ethier (2021), leur présence dans les lignes directrices du Plan climat de la Ville Montréal (2020) ou parce qu'ils font partie d'objectifs de développement durable (ONU 2015). Les services écosystémiques ont été sélectionnés du fait de leur pertinence en contexte urbain, considérant le rôle des arbres dans la régulation de la pollution de l'air, des inondations et événements de surverses (Zölch et al. 2017), du climat (Nations Unies 2015b) et des îlots de chaleur (Gunawardena et al. 2017).

¹⁴ Le total des arbres considéré dans le cadre de ces analyses exclut 33 770 données de l'inventaire de la Ville de Montréal pour lesquelles certaines informations étaient manquantes (appartenance à un groupe fonctionnel ou géolocalisation).

¹⁵ À noter que les frênes ont été exclus des choix de plantation puisque l'espèce est actuellement dépérissante en Amérique du Nord à cause de l'agrile du frêne (*Agrilus planipennis*) (McCullough 2020).

Tableau 8. Indicateurs retenus pour mesurer la résistance aux aléas climatiques et l’approvisionnement en services écosystémiques des 500 000 nouveaux arbres plantés selon deux scénarios de plantation à l’échelle des cellules d’analyse.

Type	Indicateur	Description	Pertinence
Résistance à l’aléa climatique dominant ¹⁶	Vagues de chaleur	Indice de résistance des arbres face à l’aléa climatique “sécheresse”.	Plan climat de Montréal 2020-2030 (action 20).
	Sécheresses	Indice de résistance des arbres face à l’aléa climatique “sécheresse”.	
	Pluies abondantes	Indice de résistance des arbres face à l’aléa climatique “inondation”.	Objectif ¹⁷ de développement durable de l’ONU.
	Crues	Indice de résistance des arbres face à l’aléa climatique «inondation».	Plan climat de Montréal 2020-2030 (action 21).
	Tempêtes	Indice de résistance des arbres face aux aléas climatiques “glace (verglas)” et “vent”.	
Approvisionnement en services écosystémiques	Qualité de l’air	Quantité totale de polluants atmosphériques (en kg) absorbés après 30 ans.	Objectif 11 de développement durable de l’ONU.
	Atténuation des eaux de ruissellement	Quantité totale des eaux pluviales interceptées (en m3) après 30 ans.	Objectif 13 de développement durable de l’ONU.
	Séquestration du carbone	Quantité totale de carbone séquestré annuellement (en kg) sur un horizon de 30 ans.	Objectif 13 de développement durable de l’ONU.
	Stockage du carbone	Quantité totale de carbone stocké (en kg) après 30 ans.	Objectif 13 de développement durable de l’ONU.
	Indice de canopée (superficie)	Superficie (m ²) de canopée évaluée à l’échelle des arrondissements.	Landry et Hénault-Ethier (2021).
Diversité fonctionnelle	Indice de diversité fonctionnelle	Indice de diversité fonctionnelle calculée sur une échelle de 0 à 9 où 9 indique une diversité fonctionnelle maximale.	

¹⁶ Selon Brandt et al. 2017.

¹⁷ Lutte contre les changements climatiques.

5.2 Évaluation des scénarios face aux aléas climatiques

Sur la base des cinq indicateurs retenus pour mesurer la résistance des arbres aux aléas climatiques, on observe que le scénario « adaptation et résilience » obtient de meilleurs scores pour les aléas vagues de chaleur, sécheresses et tempêtes, et que le scénario « statu quo » répond mieux pour sa part aux aléas pluies abondantes et crues (figure 10).

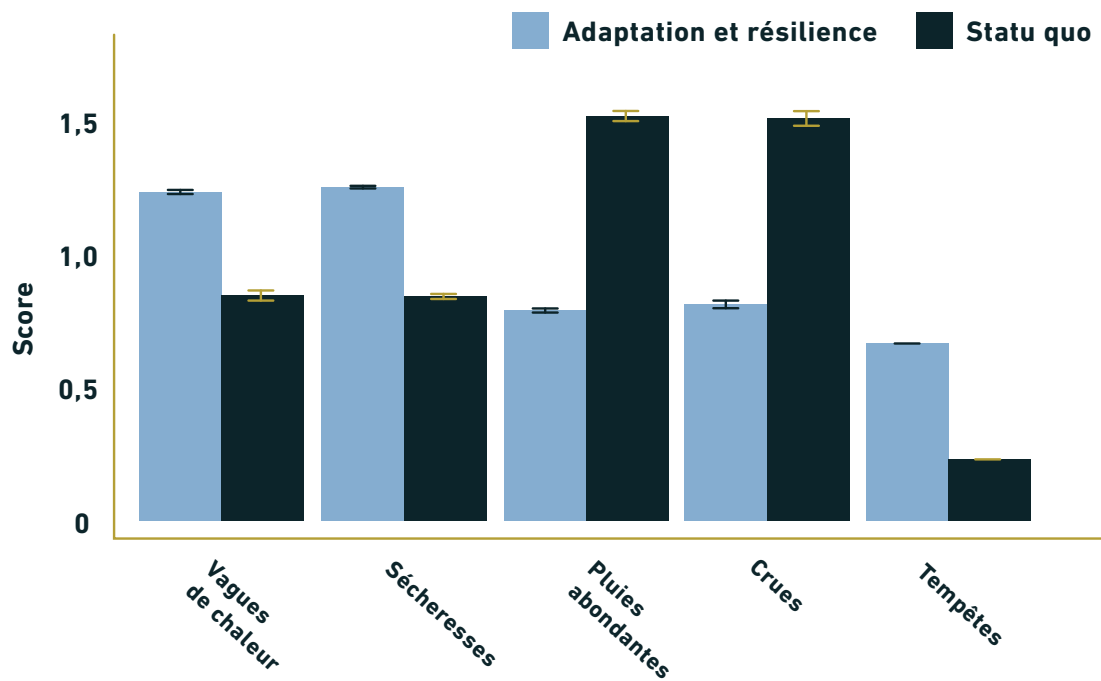


Figure 10. Comparaison de résistance aux aléas climatiques des 500 000 nouveaux arbres entre les scénarios de plantation « adaptation et résilience » et « statu quo ».

Ces résultats s'expliquent en partie par les paramètres utilisés dans le scénario « adaptation et résilience », où les espèces ont d'abord été sélectionnées dans l'optique de diversifier les arbres déjà présents sur le territoire. La diversification fonctionnelle implique de sélectionner des espèces avec des caractéristiques biologiques et des vulnérabilités complémentaires à celles des espèces actuellement présentes (voir annexe A). Or, il se trouve que le groupe fonctionnel le plus représenté actuellement (le groupe 2C), qui comprend plusieurs espèces d'érables, est caractérisé par une résistance élevée aux pluies et aux crues, mais une vulnérabilité aux épisodes de sécheresses et de vents violents. Les autres groupes fonctionnels, qui sont favorisés par l'approche de diversification fonctionnelle, présentent généralement les caractéristiques inverses et tel qu'illustré à la figure 10, sont associés à une plus grande tolérance aux vagues de chaleur, sécheresses et tempêtes, mais à une moindre tolérance aux pluies abondantes et aux crues. Cela dit, ces tendances sont uniquement associées aux 500 000 nouveaux arbres qui seraient plantés et non à l'ensemble de la canopée du territoire montréalais.

Parallèlement, le scénario « statu quo » implique la plantation d'environ un tiers d'érables (suivant la composition actuelle de la forêt urbaine montréalaise) d'où les scores plus élevés en termes de tolérance aux crues et aux pluies abondantes. Ce constat est intéressant et permet d'illustrer l'influence de certaines espèces fortement représentées sur le territoire sur la résistance de la canopée aux aléas climatiques.

5.3 Évaluation des scénarios pour l’approvisionnement en services écosystémiques et l’amélioration de l’indice de canopée

Les deux scénarios ont ensuite été comparés pour leur contribution aux quatre indicateurs suivants¹⁸ : l’amélioration de la qualité de l’air, l’atténuation des eaux de ruissellement, la régulation du climat (via la séquestration et le stockage du carbone) et l’amélioration de l’indice de canopée. Les résultats présentés à la figure 11 montrent que le scénario « statu quo » obtient des scores légèrement plus élevés pour quatre des cinq indicateurs retenus, soit l’amélioration de la qualité de l’air, l’évitement des eaux de ruissellement et la séquestration et le stockage du carbone.

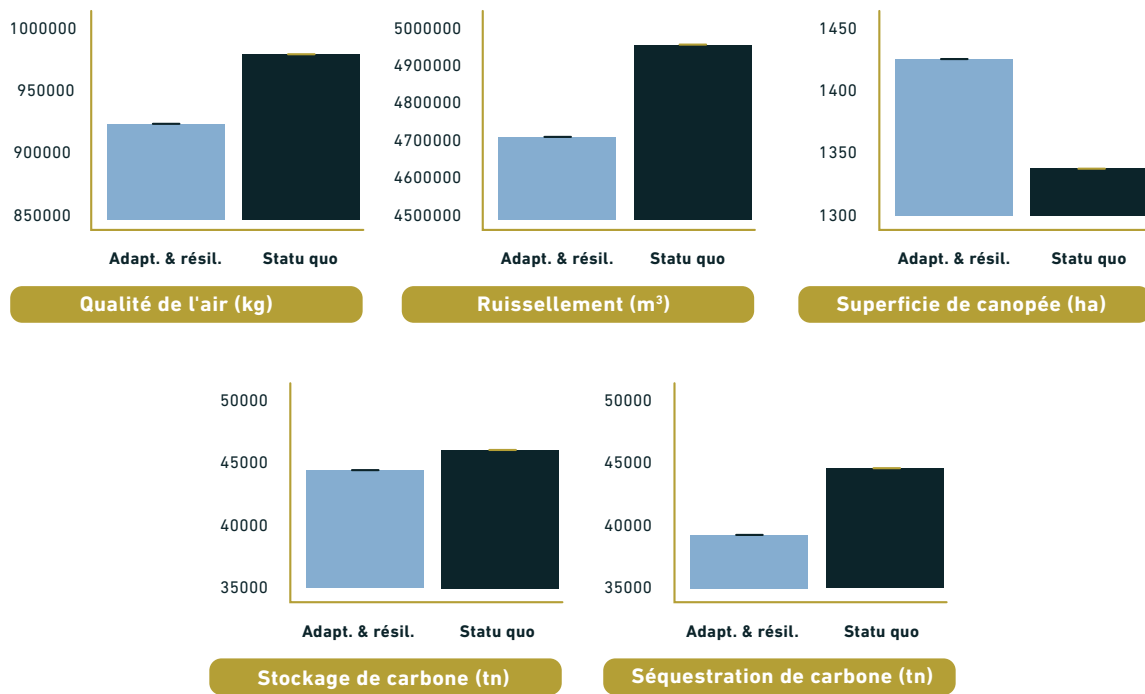


Figure 11. Comparaison de la contribution en services écosystémiques pour les scénarios de plantation « adaptation et résilience » et « statu quo » pour les 500 000 nouveaux arbres plantés à l’échelle de la Ville de Montréal. Les barres d’erreurs représentent les écarts-types pour chacune des estimations.

Une fois encore, ces résultats sont directement influencés par la dominance du genre *Acer* (érable), et des groupes fonctionnels 2C et 2AB sur le territoire montréalais. Ce genre obtient en effet parmi les meilleurs scores pour la filtration des polluants de l’air et la captation des eaux de ruissellement selon le logiciel i-Tree forecast¹⁹ (Nowak et al. 2018) et il permet aussi de séquestrer et de stocker en moyenne plus de carbone que la plupart des 82 espèces d’arbres utilisées dans le cadre de cette étude. Seule la superficie de canopée des espèces du genre *Acer* est légèrement inférieure à la moyenne de l’ensemble des espèces utilisées. En reproduisant les biais de la composition actuelle, le scénario « statu quo » maintient la dominance de ce genre et assure donc, de façon théorique, une contribution légèrement supérieure en termes de services rendus. Toutefois, bien que la diversification semble a priori réduire l’approvisionnement en services à l’échelle du territoire par rapport au scénario « statu quo », cette approche augmente la résilience de la canopée face aux menaces climatiques et biotiques (c.-à-d. insectes et maladies) et réduit ainsi les risques de mortalité à moyen et long terme. Autrement dit, la diversification des arbres assure un meilleur maintien des bénéfices pour la population dans un contexte global très incertain.

¹⁸ Les valeurs estimées se basent uniquement sur les 500 000 nouveaux arbres et non sur la totalité des arbres actuellement recensés sur le territoire montréalais.

¹⁹ La paramétrisation du modèle i-Tree forecast présumait une valeur DHP (diamètre à la hauteur de la poitrine) initiale des arbres à la plantation de 5 cm. À l’aide du logiciel, l’approvisionnement en services des arbres a été calculé sur une période de 30 ans en fonction des taux de croissance par défaut de i-Tree Eco version 6.1.36.

5.4 Évaluation des scénarios en termes de diversité fonctionnelle

Pour rappel, la Ville de Montréal a actuellement un indice de diversité fonctionnelle moyen de 3,7 sur 9 à l'échelle des cellules d'analyse, soit un niveau de diversité fonctionnel faible. La figure 12 compare les indices qui pourraient être obtenus selon les deux scénarios élaborés.

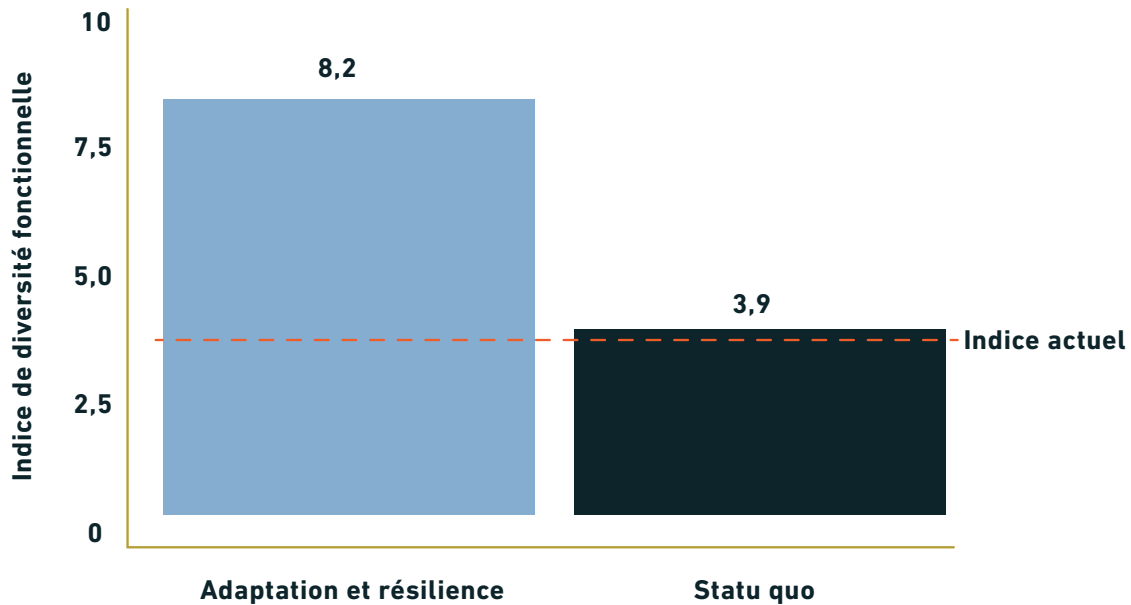


Figure 12. Comparaison des indices de diversité fonctionnelle moyens à l'échelle des cellules d'analyse pour les scénarios de plantation « adaptation et résilience » et « statu quo » après plantation des 500 000 nouveaux arbres sur le territoire de la Ville de Montréal. La ligne rouge indique l'indice de diversité fonctionnelle moyen de 3,7 sur 9 à l'échelle des cellules d'analyse. La barre d'erreur du scénario « statu quo » représente l'écart-type associé à l'indice de diversité fonctionnelle du fait des légères variations entre les 40 répétitions. Cette variation n'existe pas pour le scénario « adaptation et résilience » puisque le nombre d'arbres par groupe fonctionnel a été fixé par l'algorithme d'optimisation.

Avec l'ajout de 500 000 nouveaux arbres diversifiés suivant le scénario « adaptation et résilience », l'indice de diversité fonctionnelle moyen pourrait atteindre 8,2 sur 9 à l'échelle des cellules d'analyse, soit un niveau très élevé. Une telle augmentation permettrait de grandement réduire les risques de perte importante de la canopée en cas de perturbations climatiques ou biotiques. Ce résultat n'est pas surprenant et permet d'illustrer les bénéfices associés à un algorithme d'optimisation de la diversité fonctionnelle de la forêt urbaine montréalaise dans l'optique de la rendre plus apte à répondre aux incertitudes et conséquences des CG. Il est par ailleurs intéressant de constater que pour atteindre une canopée idéalement diversifiée (un score de 9 sur 9), il faudrait planter encore davantage d'arbres sur le territoire.

Dans le cas où les espèces seraient sélectionnées selon les mêmes proportions que l'inventaire actuel de la Ville, l'indice de diversité fonctionnelle ne changerait quasiment pas (de 3,7 à 3,9) et resterait donc à un niveau encore faible qui réduit peu les risques de perte de la canopée face aux CG. Cette légère variation s'explique par le fait que la liste d'espèces utilisée tient compte des nouvelles plantations réalisées sur le territoire montréalais (plus diversifiées depuis quelques années) et exclut aussi certains genres actuellement très

vulnérables aux menaces (p. ex., les frênes).

La diversité fonctionnelle constitue l'indicateur le plus pertinent à considérer lorsque l'on souhaite planter de nouveaux arbres urbains et assurer la durabilité de ce couvert à long terme, et ce pour deux raisons principales. D'une part, les aléas climatiques (et biotiques) actuels du territoire montréalais ne seront pas nécessairement les aléas auxquels nous ferons face d'ici quelques années. Il est donc beaucoup plus stratégique et durable de planter une diversité d'espèces d'arbres répondant différemment à une grande variété de conditions (ce sur quoi repose l'approche fonctionnelle) plutôt que de se concentrer spécifiquement sur la plantation d'espèces d'arbres adaptées à un certain aléa climatique local. D'autre part, l'approvisionnement en services écosystémiques est conditionnel à la survie des arbres. Une stratégie de plantation basée sur l'optimisation de la diversité fonctionnelle à l'échelle du territoire permet de limiter le dépérissement éventuel des arbres associés aux conditions climatiques futures ou aux ravageurs (Hudgins et al. 2021), ce qui permet aussi de réduire les potentielles pertes en services écosystémiques.



Etienne Delorieux

6. Discussion

Cette étude fournit une base méthodologique pour l'élaboration d'une stratégie de plantation de sorte que les villes puissent s'adapter et résister aux aléas des changements climatiques de manière équitable, tout en maximisant la résilience de la forêt urbaine et les bénéfices qu'elle nous fournit à long terme. Facile à adapter à d'autres contraintes, villes ou contextes d'étude, elle démontre l'importance de planifier la plantation d'arbres selon les besoins socioéconomiques et écologiques spécifiques au territoire afin de maximiser les bénéfices des interventions. L'étude démontre également comment utiliser des indicateurs pour mesurer l'impact de la plantation sur la résistance de la forêt urbaine aux aléas climatiques, l'approvisionnement en services écosystémiques, l'indice de canopée et la diversité fonctionnelle ; des conditions nécessaires à l'adaptation adéquate aux changements climatiques.

6.1 Une méthodologie facile à modifier et à bonifier

Zones potentielles de plantation

De façon générale, l'approche présentée dans le cadre de cette étude pour l'identification des zones potentielles de plantation est une base de travail fiable et robuste. Les résultats reposent sur des paramètres théoriques définis aux fins de l'exercice (p. ex., le choix de considérer seulement 10 % des superficies de stationnement pour la plantation d'arbres), mais ils devront être ajustés ou raffinés pour répondre aux différents objectifs, besoins et contraintes des aménagistes et gestionnaires urbains, suivant aussi les informations disponibles pour le territoire à l'étude.

Ces niveaux de raffinement pourraient par exemple inclure l'évitement de certaines zones pour la plantation (p. ex., sous les lignes à haute tension, à proximité des poteaux électriques ou des infrastructures souterraines), l'intégration de coûts plus spécifiques pour la déminéralisation (p. ex., déminéraliser l'asphalte d'un stationnement vs le béton d'un trottoir), l'identification de différentes fosses de plantation (p. ex., arbres de rue, de parcs ou de boulevards) de manière à mieux répondre aux enjeux locaux et aussi mieux sélectionner les espèces selon leurs caractéristiques (p. ex., capacité à améliorer la qualité de l'air, réguler les températures), ou encore l'identification des types de zonages (p. ex., résidentiel, commercial, industriel et rural) pour mieux cibler les secteurs prioritaires comme les secteurs résidentiels.

Zones de plantation à prioriser

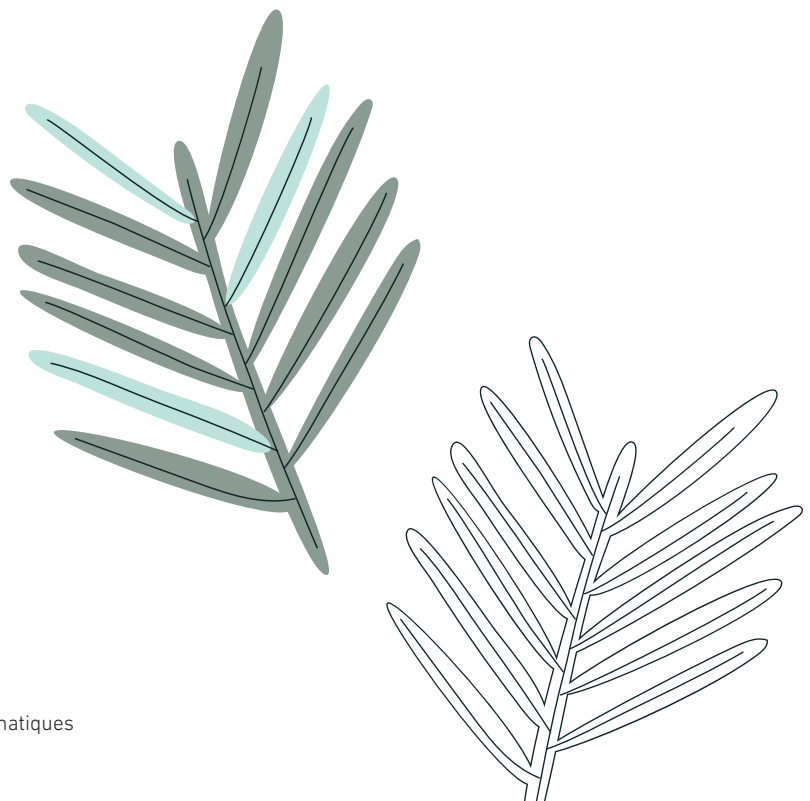
L'algorithme de priorisation des zones de plantation peut aussi être modulé selon les objectifs et les critères des aménagistes et des gestionnaires urbains. Par exemple, dans l'optique d'encourager le transport actif, il serait possible d'ajouter des critères visant à prioriser la plantation d'arbres à proximité de pistes cyclables ou de couloirs piétonniers. Comme le poids attribué à chacun des critères est aussi modulable, l'approche permet beaucoup de flexibilité et peut ainsi s'adapter à de nombreuses contraintes du territoire. Par ailleurs, dans le contexte spécifique de Montréal, compte tenu de l'annonce d'une mise à jour des données de vulnérabilités climatiques au courant de l'année 2022, il serait intéressant de réaliser une nouvelle analyse de priorisation avec ces nouveaux jeux de données pour comparer les résultats.

Sélection des espèces à planter

Le scénario « adaptation et résilience » développé dans le cadre de cette étude repose sur l'optimisation de la diversité fonctionnelle des espèces d'arbres et de leur résistance à l'aléa climatique dominant. Une façon d'ajuster ou de raffiner cette approche pourrait être d'intégrer des critères tels que la résistance au sel de déglçage, la captation des polluants atmosphériques, le potentiel allergène des espèces ou leur tolérance à l'ombre dans l'optimisation du choix des espèces à planter. À titre d'exemple, il serait possible de paramétrer l'algorithme pour privilégier des espèces plus tolérantes au sel et capables d'améliorer substantiellement la qualité de l'air le long des grands axes routiers ou éviter les espèces allergènes dans les quartiers densément peuplés ou encore, favoriser une forte densité d'espèces tolérantes à l'ombre dans les zones où il y a peu d'espace disponible, mais un besoin de densifier le couvert arboricole. À l'inverse, si l'aménagiste ou le gestionnaire urbain n'a pas d'information relative aux aléas climatiques dominants ou n'a pas en sa possession un inventaire des arbres du territoire, il est recommandé de planter de nouveaux arbres selon l'approche de la diversité fonctionnelle afin d'offrir une bonne capacité de résilience à la forêt urbaine face aux menaces climatiques et biotiques (Paquette et al. 2021). Enfin, le taux de survie des arbres (qui n'a pas été considéré dans les paramètres de cette étude), pourrait être évalué suite aux plantations et intégré aux analyses, afin d'estimer plus précisément les bénéfices rendus sur le long terme.

6.2 Vers la résilience et la durabilité de nos forêts urbaines

Bien qu'il soit tentant de s'arrêter aux données chiffrées fournies ici à des fins de comparaison, l'objectif de cette étude et notamment de l'approche développée était de proposer un outil modulable et ajustable qui, entre autres, facilite l'optimisation de la résilience des forêts urbaines (via la diversification) face aux menaces climatiques et biotiques à long terme. Il est essentiel que les arbres plantés aujourd'hui atteignent leur maturité pour que la société puisse bénéficier pleinement des services qu'ils fournissent. Outre le besoin de maintenir des arbres en santé, l'approche développée encourage à adopter une vision globale pour la mise en œuvre de la plantation d'arbres et à intégrer plusieurs types de critères dans le processus de planification. L'exercice d'optimisation permet ainsi de répondre simultanément à plusieurs enjeux importants et maximise les bénéfices des interventions. Cette étude fournit un exemple de l'application de l'approche développée en se basant sur le territoire montréalais, mais pour qu'elle soit pleinement efficace, les paramètres définis devront être ajustés aux contraintes et objectifs réels du territoire et des aménagistes et gestionnaires urbains.



7. Conclusion et recommandations

Bien que les arbres urbains fournissent des bénéfices dès leur plantation, leur contribution à notre bien-être et à notre santé ne cesse d'augmenter au fur et à mesure de leur croissance et de leur maturité. Il est donc nécessaire d'être stratégique dès l'étape de planification afin de décider où planter les arbres et quelles espèces favoriser dans une optique d'adaptation, d'équité et de résilience face aux CG.

1. Encourager la plantation en terrain privé

L'analyse montre que plus de 60 % de la superficie totale disponible pour la plantation se situe en territoire privé, d'où l'importance de stratégies, subventions et programmes encourageant la plantation sur ces terrains. Par exemple, de nombreux experts²⁰ recommandent de rendre obligatoire un financement récurrent pour les infrastructures naturelles à même les budgets consacrés aux infrastructures, et ce pour tout nouveau projet de construction ou de réfection, public ou privé. De plus, l'analyse montre que plus du tiers de la superficie disponible en zone non minéralisée est localisé sur des terrains résidentiels et donc à proximité des citoyens et citoyennes qui seraient les premiers bénéficiaires des services écosystémiques produits par une bonification de la canopée.

2. Prioriser les zones de plantation selon des enjeux socioéconomiques et écologiques

L'approche développée permet d'intégrer plusieurs critères socioéconomiques et écologiques dans l'analyse de priorisation et de choisir le poids qui devrait être accordé à chacun. Autrement dit, il est possible d'orienter l'algorithme en donnant plus d'importance à certains critères (p. ex., quartiers défavorisés, faible indice de canopée), pour que la plantation dans les zones identifiées comme prioritaires favorise davantage les critères choisis. Comme les résultats distinguent aussi les zones non minéralisées des zones minéralisées, l'aménagiste peut planifier ses interventions de façon stratégique selon le budget disponible, quitte à répartir les coûts dans le temps.

Par ailleurs, une priorisation basée sur la résilience et l'équité a révélé que certains arrondissements devraient planter beaucoup plus d'arbres que d'autres afin de faire bénéficier de manière équitable à leur population, tous les services rendus par la forêt urbaine. Ce constat met donc en lumière l'importance de mettre en place un mécanisme interne d'équité afin que les stratégies et les budgets de plantation répondent aux besoins de chaque arrondissement selon leur niveau de vulnérabilité socio-économique.

²⁰ <https://fr.davidsuzuki.org/publication-scientifique/changements-climatiques-au-quebec-volume-3/>

3. Privilégier des espèces diversifiées et résistantes aux contraintes du territoire

Parmi les scénarios comparés, le scénario « adaptation et résilience » permettrait d'augmenter l'indice de diversité fonctionnelle à un niveau très élevé (8,2/9), ce qui favoriserait grandement la résilience de la forêt urbaine en réduisant son niveau de risques face aux menaces biotiques et abiotiques et aux CC. Par ailleurs, un tel scénario vise aussi à favoriser des espèces résistantes à l'aléa climatique dominant local et s'adapte ainsi aux contraintes climatiques locales.

Avec son objectif de 500 000 nouveaux arbres sur son territoire, la Ville de Montréal met en place une mesure phare, mais nécessaire, d'adaptation aux CC. Bien qu'une telle politique puisse paraître coûteuse (notamment lorsque la plantation est prévue en zones actuellement minéralisées), il est désormais reconnu que l'investissement et les coûts d'entretien des arbres sont inférieurs aux bénéfices qu'ils fournissent à l'ensemble de la société.

Au-delà des résultats et des chiffres produits, cette étude illustre le besoin d'identifier une stratégie de plantation visant notamment à considérer les arbres comme des infrastructures à part entière au sein des villes et à minimiser leur perte dans les prochaines décennies. La planification des plantations devrait se baser aussi bien sur des critères socioéconomiques que sur des critères écologiques et favoriser la survie des arbres à long terme afin de maintenir des services essentiels dont nous sommes dépendants. Cette étude fournit un outil stratégique d'accompagnement permettant d'orienter les efforts de plantation et de localiser les sites prioritaires selon des critères préétablis qui peuvent être adaptés.

Planter 500 000 arbres c'est bien, mais le faire en plantant les bonnes espèces aux bons endroits, c'est encore mieux !



Jan Huber

8. Bibliographie

- Aquilué, N., Messier, C., Martins, K. T., Dumais-Lalonde, V., & Mina, M. (2021). A simple-to-use management approach to boost adaptive capacity of forests to global uncertainty. *Forest Ecology and Management*, 481, 118692.
- Aquilué, N., Filotas, É., Craven, D., Fortin, M. J., Brotons, L., & Messier, C. (2020). Evaluating forest resilience to global threats using functional response traits and network properties. *Ecological Applications*, 30(5), 14p.
- Aubin, I., Messier, C., Gachet, S., Lawrence, K., McKenney, D., Arseneault, A., Bell, W., De Grandpré, L., Shipley, B., Ricard, J.-P., Munson, A.D. (2012). TOPIC - Traits of Plants in Canada.
- Brandt, L., Lewis, A. D., Scott, L., Darling, L., Fahey, R. T., Iverson, L. R., ... & Swanston, C. W. (2017). Chicago wilderness region urban forest vulnerability assessment and synthesis. General technical report NRS; 89p + annexes.
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) (2020). Données numériques de la cartographie d'utilisation du sol, version 2020, compilées par la CMM. Disponible à : <http://observatoire.cmm.qc.ca/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/donnees-georeferences/>
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) (2019). Indice canopée métropolitain. Données numériques. Disponible à : <http://observatoire.cmm.qc.ca/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/donnees-georeferences/>
- Ghalanos A. & Theussl, S. (2015). Rsolnp: General Non-linear Optimization Using Augmented Lagrange Multiplier Method. R package version 1.16.
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., and Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Sci. Total Environ.* 584–585, 1040–1055p.
- Hanson J.O., Schuster, R., Morrell, N., Strimas-Mackey, M., Edwards B.P.M., Watts ME, ..., Possingham H.P. (2022). Prioritize: Systematic Conservation Prioritization in R. R package version 7.1.1. Disponible à : <https://cran.r-project.org/package=prioritize>
- Hijmans, R. J., & van Etten, J. (2012). raster: Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 2.0-12. <http://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Hill, M.O. (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology* 54, 427–473 cited in Magurran, A. E., 2004, *Measuring biological diversity*, Blackwell Publishing: Oxford, UK. 256 p.
- Hudgins, E. J., Koch, F. H., Ambrose, M. J., & Leung, B. (2021). Hot and cold spots of pest-induced US urban tree death, 2020-2050. *bioRxiv*.
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos* 113: 363 - 375. DOI: 10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x
- Landry, F. & Hénault-Ethier, L. (2021). Changements climatiques au Québec : s'adapter pour un meilleur avenir. Volume I. Fondation David Suzuki. 39p.
- Landry, F., Tanguy, O., Dumais-Lalonde, V., Maure, F., Dupras J., et Hénault-Ethier, L. (2021). Définir les objectifs de l'adaptation aux changements climatiques et les stratégies pour les atteindre. Volume II. Changements climatiques au Québec : s'adapter pour un meilleur avenir. Fondation David Suzuki. 43p + annexes
- Landry, F., Dupras, J., and Messier, C. (2020). Convergence of urban forest and socio-economic indicators of resilience: a study of environmental inequality in four major cities in eastern Canada. *Landsc. Urban Plan* 202:103856. doi: 10.1016/j.landurbplan.2020.103856
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Oxford, UK: Blackwell.
- Habitat (2019). Calcul des services écosystémiques d'arbres publics nouvellement plantés. Rapport présenté auprès de la Ville de Montréal. 17p.
- McCullough, D. G. (2020). Challenges, tactics and integrated management of emerald ash borer in North America. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 93(2), 197-211p.
- McPherson, E. G., van Doorn, N., & de Goede, J. (2016). Structure, function and value of street trees in California, USA. *Urban forestry & urban greening*, 17, 104-115p.
- McPherson, G., Simpson, J. R., Peper, P. J., Maco, S. E., and Xiao, Q. (2005). Municipal forest benefits and costs in five US cities. *Journal of forestry*. 103(8), 411-416p.

- Nations Unies. (2015a) Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030. 38p. Disponible à : <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/90/PDF/N1529190.pdf?OpenElement>
- Nations Unies. (2015b). Accord de Paris. 26p. Disponible à : https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/french_paris_agreement.pdf
- Nesbitt, L., Meitner, M. J., Girling, C., Sheppard, S. R. J., and Lu, Y. (2019). Who has access to urban vegetation? A spatial analysis of distributional green equity in 10 US cities. *Landsc. Urban Plan.* 181, 51–79. doi: 10.1016/j.landurbplan.2018.08.007
- Nowak, D. J., Maco, S., & Binkley, M. (2018). i-Tree: Global tools to assess tree benefits and risks to improve forest management. *Arboricultural Consultant.* 51 (4): 10-13., 51(4), 10-13.
- Niinemets, Ü., Valladares, F. (2006). Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate Northern Hemisphere Trees and Shrubs. *Ecological Monographs.* 76(4): 521-547. DOI: 10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2
- OpenStreetMap contributors. (2021). Disponible à <https://planet.openstreetmap.org>
- Ordóñez, C., Duinker, P. (2014) Assessing the vulnerability of urban forests to climate change. *Environmental Reviews* 22 (3), 311-321. doi.org/10.1139/er-2013-0078.
- Paquette, A., Sousa-Silva, R., Maure, F., Cameron, E., Belluau, M., & Messier, C. (2021). Praise for diversity: A functional approach to reduce risks in urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127157.
- Paquette, A., Messier, C. (2016). Repenser la diversité – l'approche fonctionnelle. Chaire de recherche CRSNG / Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance des arbres, Université du Québec à Montréal. <http://www.arbresurbains.uqam.ca/fr/guidereboisement/guide.php>
- Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*, 10(1), 439–446. doi:10.32614/RJ-2018-009.
- Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., ... & Pauleit, S. (2015). Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(3), 466-479p.
- QGIS Development Team (2022). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Song, X. P., Tan, P. Y., Edwards, P., & Richards, D. (2018). The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 162-170p.
- Statistique Canada. (2016). Indice canadien de défavorisation multiple (ICDM); guide de l'utilisateur. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/45-20-0001/452000012019002-fra.htm>
- Ville de Montréal. (2022). La Ville de Montréal dévoile son bilan du programme de la forêt urbaine pour l'année 2021. Communiqué de presse. Cabinet de la mairesse et du comité exécutif. 30 septembre 2022. Disponible à : https://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=5798,42657625&_dad=portal&_schema=PORTAL&id=34635
- Ville de Montréal. (2020). Plan climat 2020-2030. 111p + annexe. Disponible à : <https://montreal.ca/articles/plan-climat-montreal-objectif-carboneutralite-dici-2050-7613>
- Ville de Montréal. (2017). Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020. 134p + annexes. Disponible à : http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/enviro_fr/media/documents/paccam_2015-2020_lesconstats.pdf
- Wickham et al., (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Zölch, T., Henze, L., Keilholz, P., & Pauleit, S. (2017). Regulating urban surface runoff through nature-based solutions—an assessment at the micro-scale. *Environmental research*, 157, 135-144p.

9. Annexes

ANNEXE A

Méthodologie pour évaluer la diversité fonctionnelle

La diversité est une caractéristique descriptive très importante pour évaluer la résilience d'une forêt urbaine face aux perturbations, notamment celles associées aux changements globaux (CG). Il existe plusieurs manières de mesurer cette diversité.

L'approche traditionnelle de mesure de la diversité est basée sur le recensement du nombre d'espèces d'arbres présentes dans un inventaire. Cette mesure de diversité, aussi appelée richesse spécifique, est relativement facile à appliquer, mais elle demeure moins efficace que la diversité fonctionnelle pour mesurer la résilience face aux CG puisque plusieurs espèces d'arbres distinctes (p. ex., frêne d'Amérique, frêne noir) partagent pourtant un grand nombre de caractéristiques qui les rendent vulnérables aux mêmes perturbations (p. ex., agrile du frêne).

L'approche mobilisée par Habitat, celle de la diversité fonctionnelle, repose sur le fait que les caractéristiques biologiques des arbres, aussi appelées traits fonctionnels, nous renseignent davantage sur leurs fonctions, leurs vulnérabilités et les services qu'ils produisent que leur classification en tant qu'espèces. En effet, ces caractéristiques biologiques, incluant par exemple la densité du bois ou la taille des semences, influencent le mode de fonctionnement des arbres et déterminent donc la façon dont ils vont répondre et s'adapter aux conditions environnementales. Face à l'incertitude liée au CG, une forêt urbaine résiliente sera une forêt composée d'espèces d'arbres variées ayant des tolérances et vulnérabilités diversifiées, lui permettant ainsi de mieux s'adapter au plus grand nombre de stress possible.

Une méthode simple d'application de l'approche fonctionnelle consiste à regrouper les espèces d'arbres selon la similitude de leurs traits fonctionnels, sous forme de groupes fonctionnels. L'approche pour la formation des groupes fonctionnels a été adaptée de Paquette et al. (2021) et Aquilué et al. (2021) en se basant sur dix traits fonctionnels. Les traits fonctionnels sélectionnés sont la masse des graines, la densité du bois, la tolérance à la sécheresse, la tolérance à l'ombre, la tolérance aux inondations, le vecteur de dispersion des graines, la masse foliaire spécifique, la teneur en azote, le mode de mycorhization et la division taxonomique (angiosperme ou gymnosperme). Ils ont été obtenus à partir des études de Niinemets et Valladares (2006) et Aubin et al. (2012). Les principales espèces d'arbres retrouvées dans les milieux urbains du Québec (indigènes et ornementales) ont ainsi été regroupées en 5 grands groupes qui se subdivisent en un total de 10 sous-groupes, ou 9 dans le cadre de ce projet (figure A2).

La liste complète des espèces comprises dans chacun des groupes fonctionnels est disponible sur le site de la Chaire de recherche CRSNG/Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance de l'arbre²². Les individus identifiés seulement aux genres dont toutes les espèces appartiennent au même groupe fonctionnel ont été considérés comme faisant partie de ce même groupe fonctionnel. La diversité fonctionnelle se trouvant davantage entre les espèces qu'entre les variétés et cultivars, ceux-ci ont été classés dans les mêmes groupes que l'espèce à laquelle ils appartiennent (p. ex., *Acer platanoides* « Crimson King » : Groupe 2AB comme *Acer platanoides*). Pour les hybrides, les traits fonctionnels des espèces parentes ont été documentés

²² arbresurbains.uqam.ca/

lorsque cela était possible (p. ex., *Acer x freemanii* : Groupe 2C comme *Acer rubrum* et *Acer saccharinum*). Les données sur les traits fonctionnels n'étant pas disponibles pour toutes les espèces, certains genres et espèces n'ont pu être classés dans un groupe fonctionnel. Après avoir retiré les espèces qui n'auraient pas pu être assignées à un groupe fonctionnel ou géolocalisées, 89 % des 318 267 arbres de l'inventaire de la Ville de Montréal ont été retenus pour le calcul de la diversité fonctionnelle.

Le calcul de l'indice de diversité fonctionnelle se fait sur la base du nombre de groupes fonctionnels présents et de leur abondance relative (Hill, 1973 dans Magurran, 2004). Cet indice correspond à l'indice d'entropie de Shannon qui, lorsque porté à l'exponentielle (*exp*), permet de calculer ce que l'on appelle le nombre effectif de groupes fonctionnels (NEGF), où chaque groupe obtient un poids différent dans le calcul selon son abondance dans la zone étudiée.

Le NEGF, ou indice de diversité fonctionnelle, est calculé selon l'équation suivante, tirée de Aquilué et al. (2021) :

$$NEGF = \exp\left(-\sum_{i=1}^n p_i \log(p_i)\right)$$

où

n = le nombre total de groupes fonctionnels dans le peuplement / le territoire étudié et représente également la valeur maximale de diversité fonctionnelle.

p_i = l'abondance relative du groupe fonctionnel i dans le peuplement / le territoire étudié.

Cet indice prend une valeur minimale de 1 lorsqu'un seul groupe est présent dans la zone étudiée. La valeur maximale de l'indice est égale au nombre maximal de groupes fonctionnels, soit 9 dans le cadre de ce projet, et correspond à une communauté équitablement répartie au sein de chacun des 9 sous-groupes fonctionnels. Autrement dit, dans un cas idéal, tous les groupes fonctionnels seraient également représentés sur le territoire étudié (même nombre d'arbres par groupe fonctionnel). L'application de cet indice fournit donc un aperçu important quant à la répartition et la représentation des groupes fonctionnels au sein du territoire. Le tableau A1 présente les différentes classes de diversité fonctionnelle variant de très faible à très élevée.

Tableau A1. Niveau de diversité fonctionnelle selon l'indice de diversité fonctionnelle.

Indice de diversité fonctionnelle (ou NEGF)	Niveau de diversité fonctionnelle
1,0 à 2,5	Très faible
2,6 à 5,0	Faible
5,1 à 7	Intermédiaire
7,1 à 8,0	Élevée
8,1 à 9,0	Très élevée

1	1A	Conifères, tolérance à l'ombre, intolérance à la sécheresse ou à l'inondation, dispersion par le vent	Épinettes, sapins et thuyas et le pin blanc
	1B	Conifères, intolérance à l'ombre, tolérance à la sécheresse, dispersion par le vent	Pins, mélèzes, genévriers et ginkgo
2	2A	Tolérance à l'ombre, feuilles larges et minces, croissance moyenne, dispersion par le vent	Érables, tilleuls, magnolias, hêtre, ostryer et quelques petits arbres
	2B	Tolérance à l'ombre, feuilles larges et minces, croissance moyenne, dispersion par gravité	Marronniers
	2C	Grands arbres, tolérance à l'inondation, dispersion par le vent	Ormes, frênes, micocoulier, érable rouge, argenté, negundo
3	3A	Petits arbres, tolérance à la sécheresse, feuilles épaisses, croissance faible, dispersion par les animaux	Rosacées (sorbier, poirier, aubépine et amélanchier) et lilas
	3B	Arbres moyens, intolérance à l'inondation, dispersion par les animaux	Grandes rosacées, Catalpa, Maackia et d'autres espèces
4	4A	Grands arbres, tolérance à la sécheresse, dispersion par les animaux	Chênes, noyers et caryers
	4B	Grande tolérance à la sécheresse, intolérance à l'ombre ou à l'inondation, dispersion par les animaux	Légumineuses (févier, chicot, robinier, gainier)
5	5A	Tolérance à l'inondation, croissance rapide, dispersion par le vent	Peupliers, saules, aulnes et bouleaux (sauf le bouleau jaune)

Figure A1. Caractéristiques biologiques et écologiques des groupes fonctionnels formés avec les espèces d'arbres. Les groupes fonctionnels sont tirés et adaptés de Paquette et Messier (2016). À noter que compte tenu de leur similitude et dans l'optique de ne pas surreprésenter les marronniers, les groupes 2A et 2B ont été combinés (2AB).

Références de l'annexe A

Aubin, I., Messier, C., Gachet, S., Lawrence, K., McKenney, D., Arseneault, A., Bell, W., De Grandpré, L., Shipley, B., Ricard, J.-P., Munson, A.D. (2012). TOPIC - Traits of Plants in Canada.

Aquilué, N., Messier, C., Martins, K. T., Dumais-Lalonde, V., & Mina, M. (2021). A simple-to-use management approach to boost adaptive capacity of forests to global uncertainty. *Forest Ecology and Management*, 481, 118692.

Hill, M.O. (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology* 54, 427–473 cited in Magurran, A. E., 2004, *Measuring biological diversity*, Blackwell Publishing: Oxford, UK. 256 p.

Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos* 113: 363 - 375. DOI: 10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x

Niinemets, Ü., Valladares, F. (2006). Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate Northern Hemisphere Trees and Shrubs. *Ecological Monographs*. 76(4): 521-547. DOI: 10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2

Paquette, A., Sousa-Silva, R., Maure, F., Cameron, E., Belluau, M., & Messier, C. (2021). Praise for diversity: A functional approach to reduce risks in urban forests. *Urban Forestry and Urban Greening*, 62(February). <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127157>

Paquette, A., Messier, C. (2016). Repenser la diversité – l'approche fonctionnelle. Chaire de recherche CRSNG / Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance des arbres, Université du Québec à Montréal. Disponible à : <http://www.arbresurbains.uqam.ca/fr/guidereboisement/guide.php>

ANNEXE B

Méthodologie pour l'identification des zones potentielles de plantation

L'identification des zones potentielles de plantations, c'est-à-dire l'ensemble des zones susceptibles d'accueillir des arbres, a nécessité l'élaboration d'une méthodologie présentée ci-dessous. Le croisement des informations de plusieurs couches SIG a été nécessaire (tableau B1). La couche matricielle d'*indice canopée métropolitain* (2019) produite par la CMM (2019) a servi de couche de base de l'analyse. Cette couche classe le territoire de la Ville de Montréal en 5 catégories (figure B1).

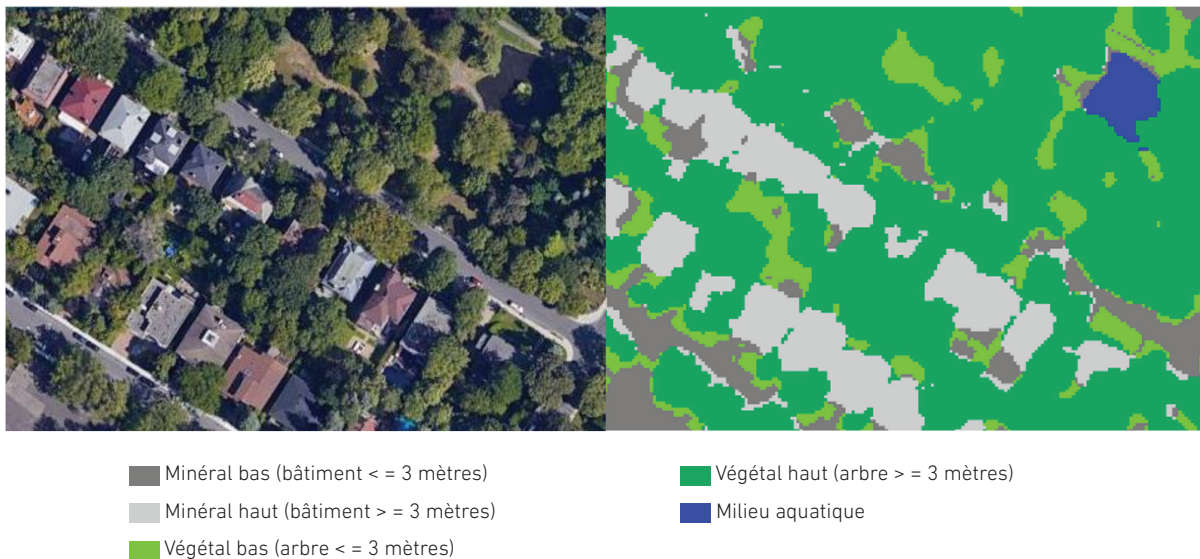


Figure B1. Couche matricielle Indice de canopée métropolitain (2019).

Après analyse de cette couche, seules les superficies situées dans le minéral bas (\leq 3 mètres) (« zones minéralisées ») dans le cadre de cette étude) et le végétal bas (\leq 3 mètres) (« zones non minéralisées ») ont été considérées comme potentiellement propices à la plantation d'arbres.

Les étapes suivantes ont consisté à raffiner la couche d'Indice de canopée métropolitain (2019) en créant des masques géomatiques pour éliminer les zones ne convenant pas à la plantation d'arbres. La couche d'occupation des sols de la CMM (CMM 2020) a été utilisée pour exclure les zones suivantes, même si certains éléments se retrouvaient dans les zones non minéralisées : les milieux agricoles, les milieux humides, les terrains de sport, les jardins communautaires, les golfs, les routes et autoroutes, les cimetières, les prisons et l'aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau de Montréal.

Une zone tampon de 3 mètres a également été créée autour des jeunes arbres avec un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de moins de 5 cm déjà présents selon l'inventaire des arbres de Montréal et situés dans les zones non minéralisées afin de leur laisser la place de se développer. En parallèle, une autre zone tampon de 2 mètres a été créée autour des bâtiments pour éviter de planter des arbres directement à côté des bâtiments (tableau B1), comme le recommande le plan maître de plantation de l'arrondissement Rosemont-La Petite-Patrie (2021). Des règles ont également été créées pour éviter de planter des arbres à moins de 8 mètres des intersections routières ou à moins de 0,8 mètre des routes (tableau B1), afin de respecter le plan maître de plantation de l'arrondissement Rosemont-La Petite-Patrie (2021).

Finalement, pour les zones non minéralisées, un traitement géomatique a été réalisé pour éliminer les sites considérés comme potentiellement propices à la plantation d'arbres, mais dont l'espace disponible ne permettait pas aux arbres de croître pleinement. En suivant les recommandations de Pretzsch et al. (2015) pour déterminer la superficie minimale nécessaire pour planter un arbre, les zones de moins de 80 m² ont été exclues comme on l'observe sur la figure suivante (figure B2) où les zones jaunes représentent les superficies retirées de l'analyse. Les zones bleues sont à l'inverse les zones où il est possible de planter de nouveaux arbres.



Figure B2. Sites de plantation retirés par manque d'espace ou jugés propices dans les zones non minéralisées.

Les résultats de l'identification des zones potentielles de plantation dans les zones non minéralisées sont regroupés au sein d'une couche au format matricielle (Zones_plnt_pot_MTL.tif). Précisons toutefois que certains paramètres non pris en compte dans l'analyse pourraient réduire considérablement la superficie totale disponible pour la plantation, comme la présence de câbles souterrains, de pylônes électriques ou de bornes-fontaines. À titre de comparaison, la Ville de Montréal estime qu'il est possible de planter environ 500 000 arbres sur son territoire.

Quant au calcul de la superficie des zones minéralisées par cellule d'analyse, elle correspond à la superficie des trottoirs et des stationnements situés dans le « minéral bas » (bâtiment \leq 3 m) selon la couche matricielle Indice de canopée métropolitain (2019). La superficie totale des trottoirs est retenue dans le calcul par cellule pour les zones minéralisées, mais seulement 10 % de la superficie totale de stationnements sont considérés comme potentiels pour la plantation d'arbres afin de laisser assez d'espace pour les automobiles. Cette valeur de 10 % est une valeur conservatrice considérant que le Conseil régional de l'environnement de Montréal suggère la mise en place de stationnements écoresponsables où la canopée mature serait égale à 40 % de la superficie totale du stationnement. La valeur pourrait être changée dans le modèle.

Tableau B1. Jeux de données mobilisés pour la création de la couche matricielle des zones potentielles de plantation.

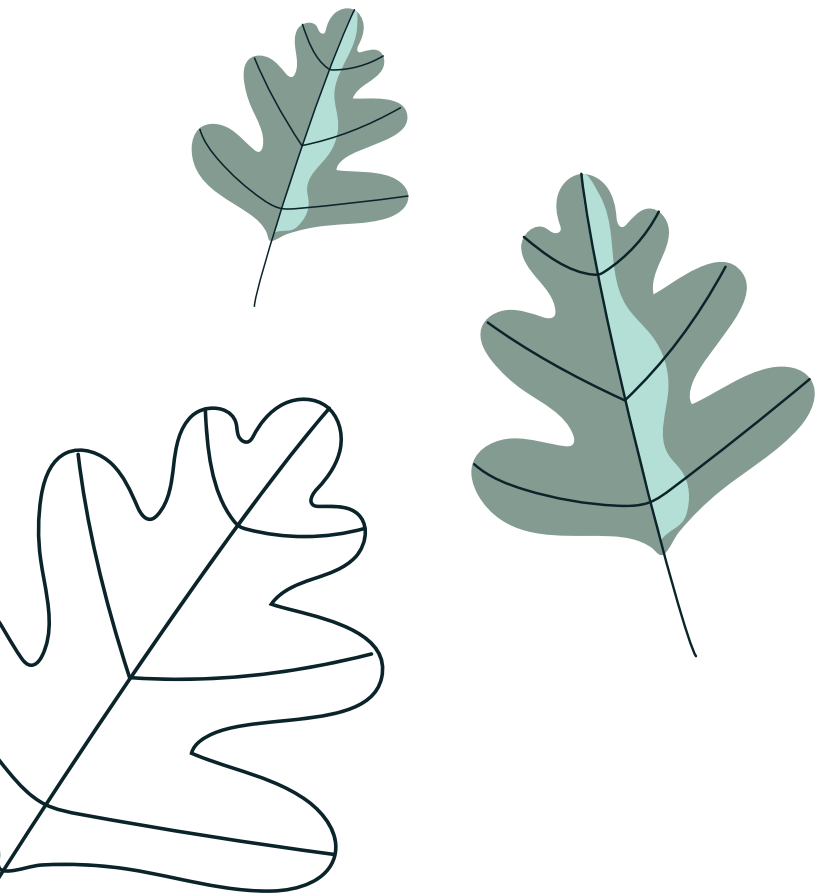
Données	Description	Source
Cimetières	Délimitation et emplacement des cimetières de Montréal	OpenStreetMap contributors (2021)
Délimitation de la région d'étude et de ses arrondissements	Limite physique de Montréal et des arrondissements de la Ville	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/polygones-arrondissements
Intersection (nœud) de rues	Données ponctuelles spécifiques aux intersections de rues	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/voirie-trottoir-ilot
Indice canopée métropolitain (2019)	Découpage du territoire selon 5 classes : Végétal bas (<= à 3m) Végétal haut (+ de 3m) Minéral bas (<= à 3m) Minéral haut (+ de 3m) Milieu aquatique	http://observatoire.cmm.qc.ca/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/donnees-georeferencees
Jardins communautaires	Délimitation et emplacement des jardins communautaires de Montréal	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/jardins-communautaires
Plan d'occupation des sols détaillé (2020)	Découpage du territoire selon 25 classes d'affectation du territoire	http://observatoire.cmm.qc.ca/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/donnees-georeferencees/
Plan d'occupation des sols simplifié (2020)	Découpage du territoire selon 9 classes d'affectation du territoire.	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/affectation-du-sol
Routes et ruelles	Délimitation et emplacement des routes et ruelles de Montréal	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/voirie-trottoir-ilot
Terrain de sport	Délimitation spatiale des terrains de sport de la Ville de Montréal	OpenStreetMap contributors (2021)
Trottoirs (surface)	Données géoréférencées des trottoirs de la Ville de Montréal	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/voirie-trottoir-ilot
Bâtiments	Données géoréférencées des empreintes de bâtiments de la Ville de Montréal	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/batiment-2d
Vulnérabilité crue 2016	Données cartographiques spécifiques au risque de crue issu de l'analyse de vulnérabilité élaborée dans le cadre du Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020. Vulnérabilité pondérée en cinq classes (non significative, mineure, modérée, élevée, majeure)	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/vulnerabilite-changements-climatiques
Vulnérabilité pluie abondante 2016	Idem que la couche Vulnérabilité crue 2016 mais pour l'aléa pluie abondante	Ville de Montréal (2017)
Vulnérabilité tempêtes 2016	Idem que la couche Vulnérabilité crue 2016 mais pour l'aléa tempêtes	Ville de Montréal (2017)
Vulnérabilité sécheresse 2016	Idem que la couche Vulnérabilité crue 2016 mais pour l'aléa sécheresse	Ville de Montréal (2017)
Vulnérabilité vague de chaleur 2016	Idem que la couche Vulnérabilité crue 2016 mais pour l'aléa vague de chaleur	Ville de Montréal (2017)
Liste des espèces arborées inventoriées	Ensemble d'informations géoréférencées des arbres des arrondissements de la Ville de Montréal. Information manquante pour les arrondissements Anjou, Outremont, Montréal Nord, Île Bizard et Lachine	https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/arbres

Références de l'annexe B

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2020). Utilisation du sol 2020. Couche géomatique géoréférencée, agglomération de Montréal 660-US-2020. Disponible à : https://observatoire.cmm.qc.ca/produits/donnees-georeferences/#utilisation_du_sol

OpenStreetMap contributors. (2021). Disponible à <https://planet.openstreetmap.org> .

Ville de Montréal. (2017). Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020. 134p + annexes. Disponible à : <http://ville.montreal.qc.ca/>



ANNEXE C

Vulnérabilités climatiques et grille d'analyse

La Ville de Montréal a mis à disposition du public, dans le cadre du Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020 (Ville de Montréal 2017), un ensemble de couches d'information géomatique répertoriant et pondérant les secteurs de vulnérabilités climatiques de la Ville. Ces couches découpent l'ensemble de la ville en cellule de 250 m x 250 m (figure C1) pour lesquels 5 vulnérabilités sont identifiées, soient les crues, les pluies abondantes, les tempêtes, les vagues de chaleur et les sécheresses. Chacune de ces vulnérabilités est pondérée sur le territoire en cinq classes d'intensité soit vulnérabilité non significative, mineure, modérée, élevée, majeure.

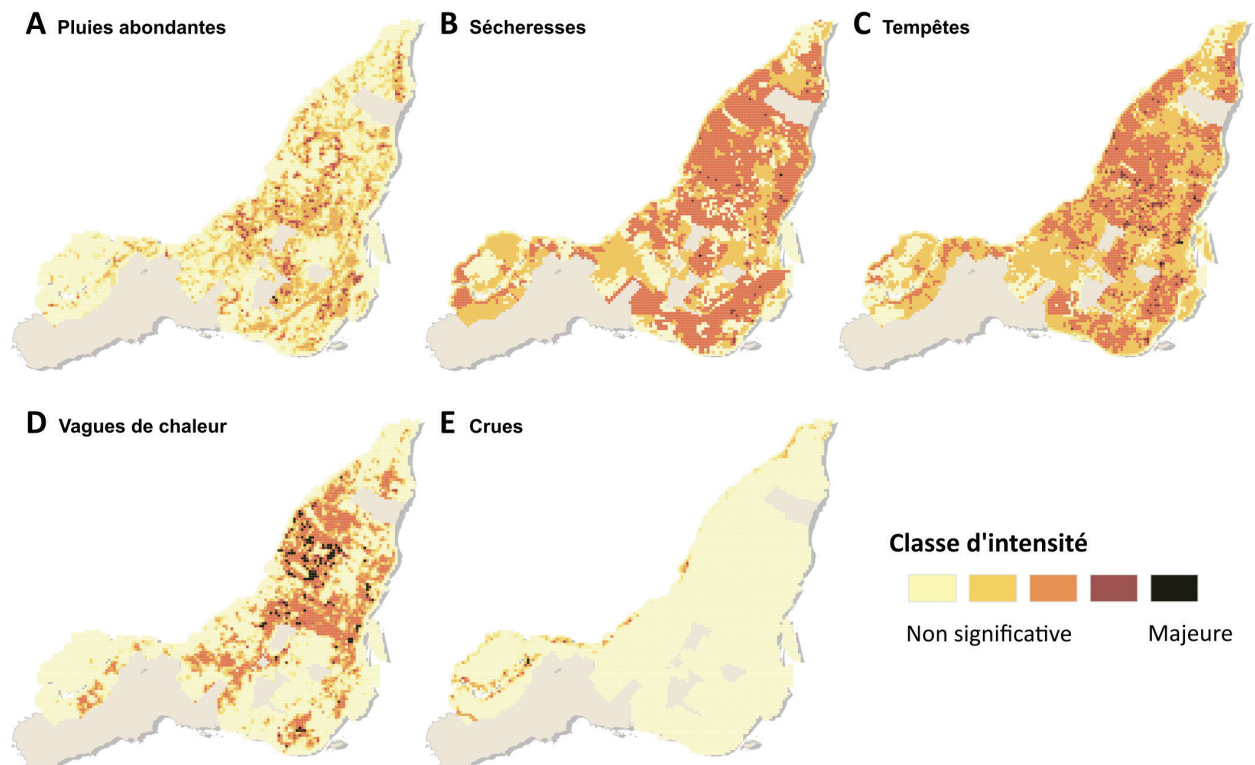


Figure C1. Grille d'analyse pour chacune des cinq vulnérabilités climatiques analysées pour la Ville de Montréal (2017), soit A) pluies abondantes, B) sécheresses, C) tempêtes, D) vagues de chaleur et E) crues.

Comme des vulnérabilités d'intensité équivalente peuvent se superposer sur le territoire, un travail de hiérarchisation a été mené pour savoir quelles vulnérabilités traiter en priorité lors de la plantation des 500 000 arbres. Pour ce faire, l'équipe de réalisation a évalué l'impact potentiel de chacune des vulnérabilités selon trois critères, soit l'impact de l'aléa sur la population, l'impact de l'aléa sur la santé des arbres et la capacité des arbres à atténuer l'aléa (tableau C1). Les avis d'experts du Bureau de la transition écologique et de la résilience et la division Forêt urbaine de la Ville de Montréal ont également été utilisés pour valider ce classement (comm. pers., 2022).

Rang	Vulnérabilité	Impact sur les résidents	Impact sur la santé des arbres	Capacité des arbres à lutter contre l'aléa	Justification additionnelle
1	Vague de chaleur	Élevé	Modéré	Élevé	Indicateur du plan climat de Montréal 2020-2030 (action 20).
2	Pluies abondantes	Modéré	Faible	Élevé	Indicateur de développement durable des Nations Unies (2015a) (objectif 13, lutte contre les changements climatiques).
3	Crue	Élevé	Modéré	Modéré	La restauration des berges pour la biodiversité est un indicateur (action 21) du plan climat de Montréal 2020-2030.
4	Tempêtes	Modéré	Élevé	Faible	Les arbres atténuent peu cet aléa (mis à part le vent) et peuvent seulement y résister. Les tempêtes peuvent causer des dommages et donc des coûts pour la végétation et les alentours.
5	Sécheresse	Faible	Élevé	Faible	À l'échelle d'une ville, les arbres n'ont pas une grande capacité d'atténuer cet aléa, ils peuvent seulement y résister.

ANNEXE D

Comparaison des scénarios de plantation distinguant les zones de plantation situées en zones minéralisées ou non minéralisées

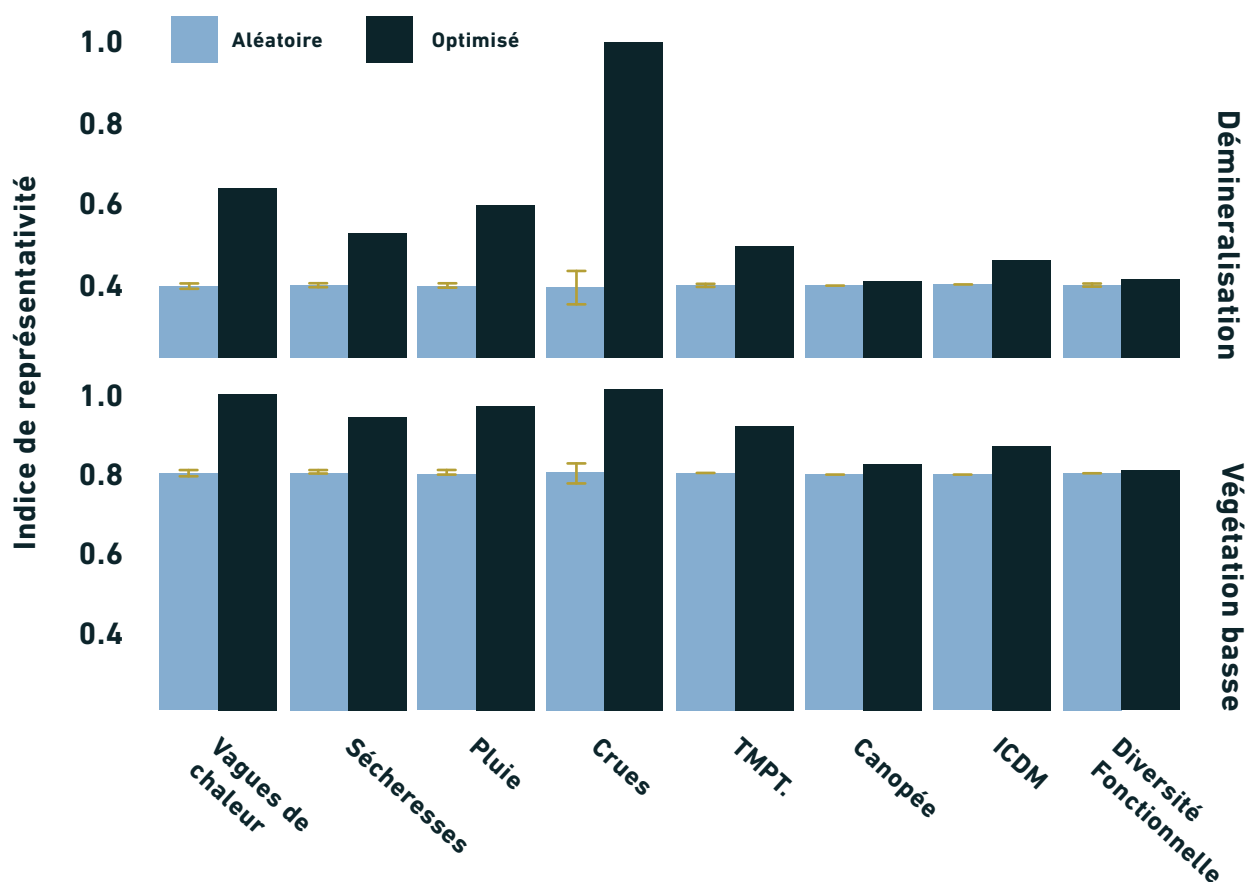


Figure D1. Comparaison des scénarios de plantation distinguant les zones de plantation situées en zones minéralisées (p. ex., stationnements, trottoirs, zones où la déminéralisation sera nécessaire) ou non minéralisées (p. ex., parcs, plates-bandes gazonnées, terres végétales, zones sans contrainte pour la plantation d'arbres). Les barres d'erreurs du scénario *Statut quo* représentent les écarts-types associés aux scores moyens du fait des légères variations entre les 40 répétitions.

ANNEXE E

Liste des espèces incluses dans les simulations

Liste E1 : Liste des espèces d'arbres incluses dans les simulations des nouvelles plantations. Toutes ces espèces ont été assignées à un groupe fonctionnel selon Paquette & Messier (2016) (voir aussi arbresurbains.uqam.ca/).

<i>Abies balsamea</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Quercus coccinea</i>
<i>Abies concolor</i>	<i>Ginkgo biloba</i>	<i>Quercus macrocarpa</i>
<i>Acer campestre</i>	<i>Gleditsia triacanthos</i>	<i>Quercus muehlenbergii</i>
<i>Acer ginnala</i>	<i>Gymnocladus dioicus</i>	<i>Quercus palustris</i>
<i>Acer miyabei</i>	<i>Juglans nigra</i>	<i>Quercus robur</i>
<i>Acer negundo</i>	<i>Juniperus virginiana</i>	<i>Quercus rubra</i>
<i>Acer palmatum</i>	<i>Larix decidua</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>
<i>Acer pensylvanicum</i>	<i>Larix laricina</i>	<i>Salix nigra</i>
<i>Acer rubrum</i>	<i>Maackia amurensis</i>	<i>Sorbus alnifolia</i>
<i>Acer saccharinum</i>	<i>Malus</i>	<i>Sorbus aucuparia</i>
<i>Acer saccharum</i>	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	<i>Syringa reticulata</i>
<i>Acer x freemanii</i>	<i>Morus alba</i>	<i>Syringa vulgaris</i>
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Morus rubra</i>	<i>Thuja occidentalis</i>
<i>Alnus incana</i>	<i>Ostrya virginiana</i>	<i>Tilia americana</i>
<i>Amelanchier arborea</i>	<i>Phellodendron amurense</i>	<i>Tilia cordata</i>
<i>Amelanchier canadensis</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Tilia mongolica</i>
<i>Amelanchier laevis</i>	<i>Picea glauca</i>	<i>Tilia tomentosa</i>
<i>Amelanchier x grandiflora 'Autumn'</i>	<i>Picea omorika</i>	<i>Ulmus americana</i>
<i>Betula alleghaniensis</i>	<i>Picea pungens</i>	<i>Ulmus davidiana</i>
<i>Betula nigra</i>	<i>Pinus banksiana</i>	<i>Ulmus pumila</i>
<i>Betula papyrifera</i>	<i>Pinus nigra</i>	<i>Ulmus rubra</i>
<i>Betula pendula</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Ulmus wilsoniana</i>
<i>Betula populifolia</i>	<i>Populus deltoides</i>	
<i>Carpinus caroliniana</i>	<i>Populus grandidentata</i>	
<i>Carya cordiformis</i>	<i>Prunus cerasifera</i>	
<i>Catalpa speciosa</i>	<i>Prunus serotina</i>	
<i>Celtis occidentalis</i>	<i>Prunus 'Snow Goose'</i>	
<i>Corylus colurna</i>	<i>Prunus virginiana</i>	
<i>Crataegus crus-galli</i>	<i>Quercus alba</i>	
<i>Elaeagnus angustifolia</i>	<i>Quercus bicolor</i>	

ANNEXE F

Méthodologie pour évaluer la résistance et la vulnérabilité des arbres à planter aux aléas climatiques

Les étapes suivantes ont été effectuées afin d'évaluer la résistance et la vulnérabilité des arbres à planter aux aléas climatiques dans le cadre des scénarios « adaptation et résilience » et « statu quo » :

- 1** Le nombre d'arbres à planter par cellule a été calculé à partir du scénario de plantation optimisée (figure 1, étape 3).
- 2** Pour chaque cellule, la diversité fonctionnelle actuelle des arbres a été calculée à partir de l'inventaire de la Ville. La répartition des groupes fonctionnels a également été calculée à cette étape. Pour les cellules où il n'y a pas de données d'inventaire, il a été présumé une valeur moyenne de l'indice de diversité fonctionnelle de 3,7 sur 9 et une répartition des groupes fonctionnels équivalente à la moyenne de l'ensemble des cellules avec des données d'inventaire.
- 3** En respectant le nombre d'arbres à planter par cellule du scénario de plantation optimisée et selon la répartition actuelle des groupes fonctionnels, l'algorithme d'optimisation Rsolnp (Ghalanos & Theussl 2015) a été utilisé pour identifier à quels groupes fonctionnels devraient appartenir les arbres à planter.
- 4**
 - a)** Ensuite, parmi les espèces sélectionnées à l'étape précédente, un tri a été effectué pour planter des arbres dont la cote de vulnérabilité développée par Brandt et al. (2017) allant de -3 (arbre très vulnérable) à +3 (arbre très résistant) est supérieure à 0. Dans le cas où un groupe fonctionnel n'est pas représenté dans la liste, toutes les espèces de ce groupe avec une cote de vulnérabilité supérieure à -2 ont été ajoutées.
 - b)** Pour évaluer la résistance et la vulnérabilité des arbres à planter aux aléas climatiques, la cote de vulnérabilité de Brandt et al. (2017) a été utilisée. Dans le cas de Ville de Montréal, les aléas suivants ont été considérés : inondation, sécheresse, la glace et le vent (tableau F1). Une cote de vulnérabilité/résistance (de -3 à +3) a ainsi été attribuée à chacun des arbres qui seraient potentiellement plantés à Montréal.

Tableau F1. Correspondance des aléas climatiques de Montréal (2017) et selon Brandt et al. (2017).

Aléa climatique produit par la Ville de Montréal (2017)	Vulnérabilité selon Brandt et al. (2017)
Tempête	« ice + wind », soit glace + vent
Pluie abondante	« Flood », soit inondation
Sécheresse	« Drought », soit sécheresse
Vague de chaleur	« Drought », soit sécheresse
Crues	« Flood », soit inondation

5 Pour chacun des deux scénarios, la simulation de plantation des arbres identifiés dans cette liste et selon le nombre d'arbres préconisé dans le scénario optimisé a été effectuée 40 fois. Ces répétitions servent à quantifier la variance de l'ensemble des solutions.

a) Scénario « adaptation et résilience » :

Pour chacune des 40 simulations, une sélection aléatoire (tirage au sort) des espèces à planter a été réalisée en fonction des critères suivants:

- Nombre d'arbres total à planter par cellule selon le scénario optimisé.
- Répartition des groupes fonctionnels préconisée selon l'algorithme d'optimisation *Rsolnp*.
- Pour chaque groupe fonctionnel, les espèces d'arbres les plus résistantes à l'aléa climatique dominant de la cellule ont une probabilité plus élevée d'être sélectionnées.

b) Scénario « statu quo » :

Pour chacune des 40 simulations, effectuer une sélection aléatoire (tirage au sort) des espèces à planter en fonction des critères suivants:

- Nombre d'arbres total à planter par cellule selon le scénario optimisé.
- Les genres d'arbres les plus abondants selon l'inventaire de la Ville de Montréal ont une probabilité plus élevée d'être sélectionnés.

6 Selon les arbres sélectionnés par scénario et pour chacune des 40 répétitions, les critères du tableau F1 sont calculés. Plus précisément, la moyenne pondérée de la côte de vulnérabilité selon Brandt et al. (2017) a été calculée en fonction de la répartition d'espèces d'arbres sélectionnées pour chaque répétition de la simulation et pour chaque cellule d'analyse. À noter que les statistiques sommaires à travers les répétitions du modèle relatives au niveau de vulnérabilité moyenne ont été décortiquées en fonction des aléas climatiques dominants des cellules. La diversité fonctionnelle avant et après l'ajout des arbres à l'échelle des cellules d'analyse est également calculée pour évaluer l'impact de chaque scénario.

Références de l'annexe F

Brandt, L., Lewis, A. D., Scott, L., Darling, L., Fahey, R. T., Iverson, L. R., ... & Swanston, C. W. (2017). Chicago wilderness region urban forest vulnerability assessment and synthesis. General technical report NRS; 89p + annexes.

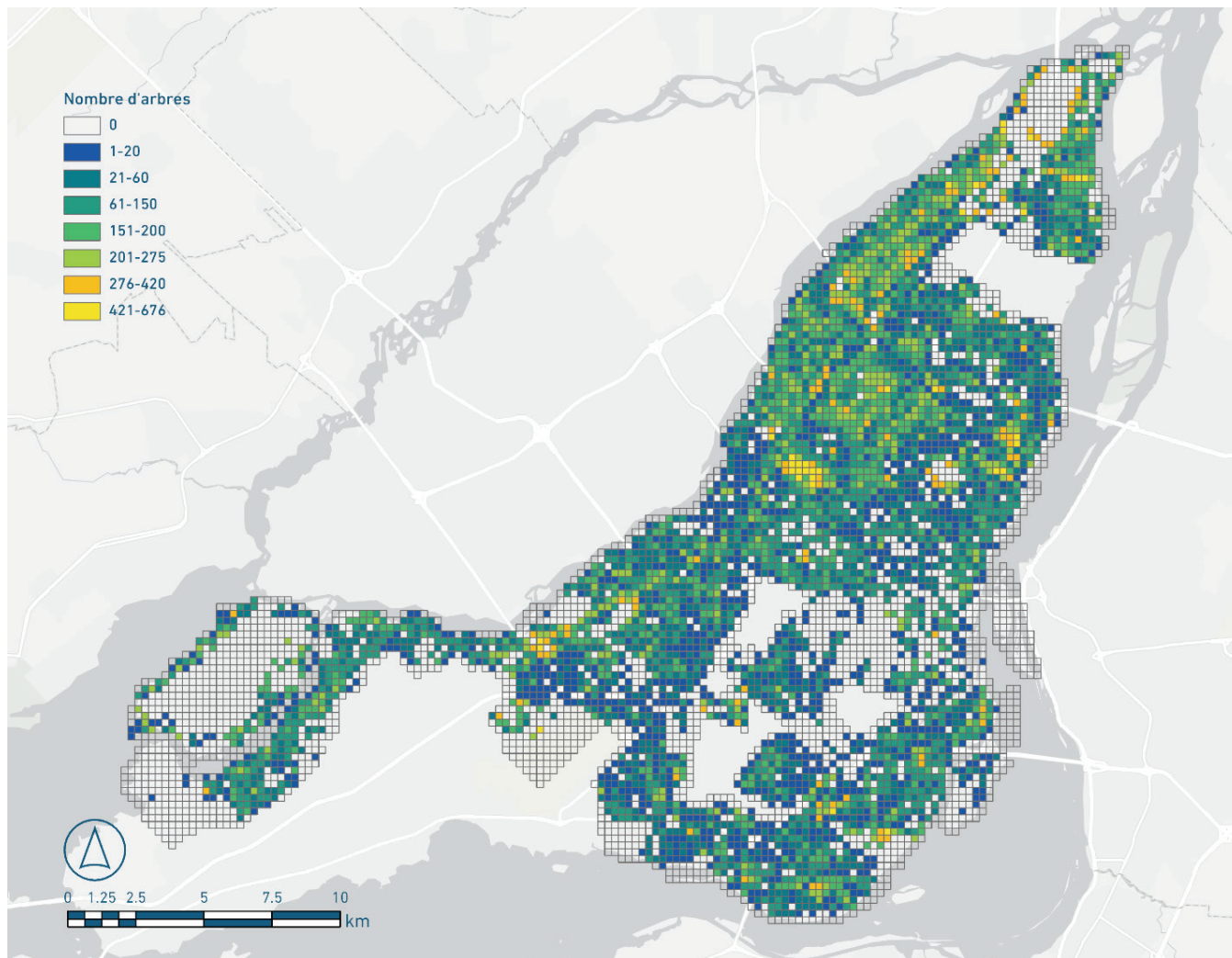
Ghalanos A. & Theussl, S. (2015). *Rsolnp*: General Non-linear Optimization Using Augmented Lagrange Multiplier Method. R package version 1.16.

Ville de Montréal. (2017). Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020. 134p + annexes. Disponible à :<http://ville.montreal.qc.ca/>

ANNEXE G

Carte de plantation d'arbres pour augmenter la résilience et l'équité face aux changements climatiques

Figure 13: Nombre d'arbres à planter en priorité sur le territoire de la Ville de Montréal pour augmenter la résilience et l'équité face aux changements climatiques. La couche géomatique est [disponible ici](#).



Cellules d'analyse 250 m par 250 m