



Technote

cerfo

FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTÉRIE

NOTE TECHNIQUE NO 2024-01

FÉVRIER 2024



Exemple d'une démarche à suivre pour planifier de nouvelles plantations résilientes en milieu urbain

Étape 1: Sélection des sites, enjeux présents et objectifs poursuivis	2
Étape 2: Conception du plan de verdissement	4
Étape 3: Choix des essences	6
Étape 4: Quantification des services écosystémiques rendus	8
Références	10

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU CERFO

Vincent Gauthray-Guyénet, Ph. D.

Emmanuelle Boulfroy, M. Sc.

Samuel Royer-Tardif, Ph. D.

PARTENAIRE DE NATURE QUÉBEC

Hubert Fortin



Cette note technique est un complément de la note 2024-01 produite par le CERFO (Où, quoi et comment planter pour accroître les services écosystémiques de la forêt urbaine) (Gauthray-Guyénet *et al.* 2024) qui présente la synthèse de lignes directrices destinées aux acteurs du verdissement en milieu urbain, afin de les aider dans leur planification ainsi que dans leurs pratiques. Cette technote est ainsi l'occasion d'illustrer un exemple d'application de ces lignes directrices et l'ensemble de la démarche qui a été développée lors de l'analyse de six études de cas en étroite collaboration avec les municipalités partenaires (Victoriaville, Québec et Montréal). Elle permet de retracer les différentes étapes suivies à partir d'un exemple concret, soit :

1. La sélection des sites après l'analyse des enjeux présents et des objectifs poursuivis par la municipalité;
2. La conception du plan de verdissement;
3. Le choix des espèces;
4. La quantification de différents services écosystémiques rendus par le projet de plantation. Trois services écosystémiques sont considérés, soit la captation des polluants atmosphériques, la séquestration du carbone et la réduction du ruissellement des eaux de pluie.

La démarche complète, la méthodologie suivie et l'analyse détaillée des six études de cas sont disponibles dans Gauthray-Guyénet *et al.* (2023a).

Rappelons que cette synthèse s'inscrit dans un projet plus vaste que la Direction adjointe des politiques de qualité de l'atmosphère Direction des politiques de l'atmosphère du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) a confié au CERFO. L'objectif général de ce projet est d'accroître les connaissances des acteurs du verdissement urbain quant à l'efficacité des arbres à remplir plusieurs services écosystémiques, et plus particulièrement à capter les polluants atmosphériques, séquestrer du carbone et réduire le ruissellement des eaux de pluie. Dans ce vaste projet confié au CERFO, deux desservices ont également été abordés : l'émission de composants organiques volatils et de pollens.

ÉTAPE 1 : SÉLECTION DES SITES, ENJEUX PRÉSENTS ET OBJECTIFS POURSUIVIS

Le choix des sites de plantation est souvent guidé par la volonté de réaliser des projets dans des secteurs où les enjeux de santé publique liés à la faible présence de la végétation sont importants. Une analyse de priorisation des sites à verdir peut alors être réalisée en se basant par exemple sur une analyse multicritère intégrant les notions suivantes :

- **Exposition à un aléa** (par exemple une concentration importante de particules fines dans l'air ambiant);
- **Vulnérabilité de la population** à cet aléa (groupe de la population plus sensible à la pollution comme les personnes âgées et les jeunes enfants);
- **Présence de mesures d'adaptation** (une canopée importante et en santé).

À la suite de cet exercice de priorisation, les sites retenus pour les études de cas devaient alors présenter les enjeux suivants :

- Avoir une faible qualité de l'air;
- Être fréquenté par un groupe de population vulnérable (présence de personnes âgées, de personnes à la santé fragile, de famille et de ménages en situation de défavorisation matérielle et sociale);
- Être situés dans un îlot de chaleur urbain ou dans un secteur présentant une concentration d'îlots de chaleur;
- Présenter un faible indice de canopée;
- Être situé sur emprise publique (afin de faciliter la mise en œuvre du projet par la municipalité).

Les discussions approfondies avec les acteurs municipaux sont importantes, car elles permettent de faire le point sur les enjeux spécifiques associés au site et confirmer la présence des critères de sélection du site. Ces échanges sont aussi l'occasion de cerner les objectifs spécifiques poursuivis par les municipalités dans le projet de verdissement et de tenter de les concilier le plus possible. Selon les cas, il peut par exemple s'agir de :

- Augmenter la canopée urbaine;
- Favoriser la biodiversité;
- Maintenir la fonction de jardin communautaire;
- Créer un espace de vie agréable pour les usagers du lieu;
- Maintenir la fonction première du site (p. ex. un stationnement);
- Améliorer la sécurité et le bien-être des usagers se déplaçant à pied et à vélo;
- Diminuer les nuisances présentes à proximité (particules atmosphériques, bruit).

Ces rencontres permettent également de prendre connaissance des contraintes pratiques qui influencent la plantation (localisation, choix des essences) telles que les réseaux d'aqueduc ou les fils électriques à éviter ou dont il faut tenir compte lors du choix de végétaux.

Afin d'illustrer la démarche de façon explicite, l'étude de cas du parc Beauclerk est présentée comme exemple. Ce site est situé à Montréal dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga Maisonneuve, dans une zone industrielle à proximité du port.

Ce cas est en effet un exemple intéressant puisqu'il regroupe plusieurs enjeux et vise une diversité d'objectifs liés au verdissement (diminuer les nuisances environnantes, augmenter la canopée, favoriser la biodiversité et développer un espace de détente diversifié et agréable pour la population locale). Il présente aussi un potentiel intéressant d'augmentation de la présence des arbres, puisqu'il consiste à fermer et végétaliser deux rues bordant un espace vert (terrain de soccer bordé d'arbres) afin de l'agrandir.



FIGURE 1. Plan de la situation existante (avant-projet) du site de Beauclerk

ÉTAPE 2 : CONCEPTION DU PLAN DE VERDISSEMENT

Dans un premier temps, étant en contexte d'une faible qualité de l'air, il est pertinent d'analyser le voisinage du parc afin de déterminer si des sources de pollution importantes peuvent nécessiter l'implantation d'un écran de végétation qui ferait obstacle entre la source d'émission et le parc. Pour cela, la recherche de sources de pollution ponctuelles (telles que les échangeurs autoroutiers, les incinérateurs, les sites de déchargement portuaire, l'industrie émettrice de rejets importants...) est réalisée en tenant compte des vents dominants. Une rose des vents indiquant la direction des vents dominants est souvent disponible dans les publications en ligne des villes.

Cette analyse pour le parc Beauclerk permet d'identifier une zone de trafic routier dense à moins d'un kilomètre de distance à l'ouest, c'est-à-dire en amont des vents dominants venant de l'ouest et du sud-ouest (figure 2). Le parc est aussi bordé au nord-est d'un grand quartier industriel potentiellement émetteur de particules. Généralement, les vents de tempête viennent du nord-est. La densification de la végétation, en utilisant des espèces à grand développement et localisées entre ces sources potentielles de pollution et le parc peut donc contribuer à protéger les usagers du site, en faisant écran à la pollution transportée par les vents.

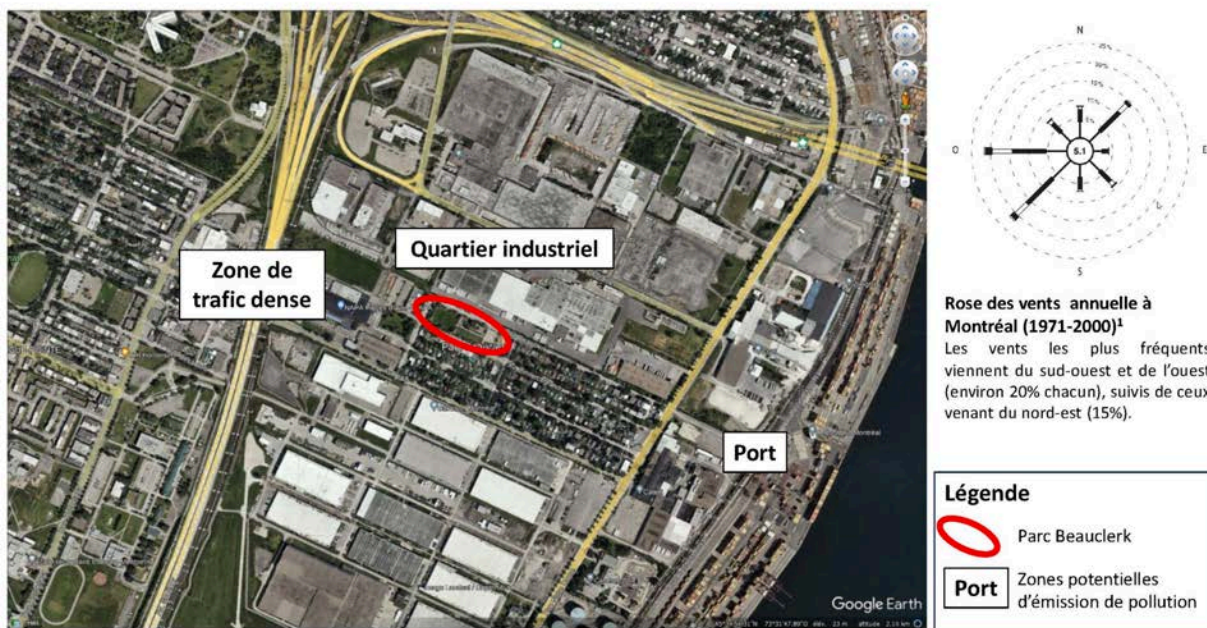


FIGURE 2. Localisation du site, des sources de pollutions environnantes et des vents dominants

¹Données issues de la station météorologique de l'aéroport international Montréal-Trudeau. Pour davantage d'information, consulter: [Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020\(montreal.qc.ca\)](http://Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020(montreal.qc.ca))

Même si l'objectif principal poursuivi par la municipalité est d'augmenter autant que possible la présence des arbres, il a été demandé d'inclure également un nouveau sentier piétonnier et une piste cyclable permettant la pratique du skateboard et de la trottinette. De plus, comme la communauté de ce quartier avait pris l'habitude et aimait jardiner dans les bacs de plantation déjà mis à disposition les années précédentes, plusieurs zones potagères ont été ajoutées au projet, intégrant des bacs et des espèces arbustives et arborescentes nourricières. Une zone plus ouverte pour la détente a été créée à proximité d'un bâtiment accueillant des travailleurs qui profitent de l'espace vert sur l'heure du midi. La figure 3 illustre le plan de verdissement proposé et préparé par Nature Québec.

Finalement, comme un objectif majeur du projet est d'augmenter la canopée urbaine, le plan de verdissement privilégie une plantation relativement dense lorsque cela ne rentre pas en conflit avec d'autres usages. Dans ce contexte, une analyse du déploiement des arbres permet de s'assurer que la distance entre deux arbres n'entraîne aucune compétition excessive. Pour les arbres à petit déploiement, « P » (p. ex. : pommiers, amélanchiers), il faut prévoir un espacement d'environ 5-6 m. En revanche, un espacement d'au moins 10 m est à prévoir pour les arbres de grand déploiement « G » (p. ex. : certains tilleuls ou chênes pouvant atteindre des diamètres de couronnes de 15 à 25 m). Dans une situation intermédiaire (espacement entre 2 arbres compris entre 6 et 10 m), des arbres à moyen déploiement « M » peuvent être retenus (comme le micocoulier occidental ou le pin flexible). Ce travail est illustré dans la loupe de la figure 3 et les détails sont consultables dans le rapport des études de cas (Gauthray-Guyénet *et al.* 2023a). Au total, le plan de verdissement comprend 331 nouveaux arbres.



FIGURE 3. Plan du projet de verdissement du site de Beauclerk



ÉTAPE 3 : CHOIX DES ESSENCES

Le choix des espèces repose sur plusieurs critères qui sont expliqués en détail dans la note technique 2024-01, soit :

- **Espèces à la fois adaptées au climat actuel de Montréal et à son climat futur;**
- **Espèces les plus performantes pour le ou plusieurs services écosystémiques recherchés**, selon le rang relatif obtenu dans le logiciel *i-Tree*;
- **Espèce respectant la taille de déploiement retenue;**
- Au besoin, **espèces répondant à certaines contraintes pratiques**, par exemple l'exclusion des espèces sensibles au sel de déglacage en bordure des zones déneigées, ou des espèces à gros fruits (marrons ou noix par exemple) en surplomb des stationnements;
- Sélection d'une **variété d'essences couvrant une diversité fonctionnelle satisfaisante**.

Le potentiel allergène au pollen des espèces n'a pu être considéré par manque de données fiables.

Le CERFO a développé une liste d'environ 120 espèces disponibles en format Excel, où ces différentes caractéristiques sont présentées. Il est possible de consulter ce tableau dans <https://cerfo.qc.ca/expertises/foresterie-urbaine/verdissement-urbain/>, de faire des tris et d'appliquer des filtres afin d'aider l'utilisateur à sélectionner les espèces répondant aux caractéristiques attendues. Par exemple :

- Filtrer pour ne retenir que les espèces adaptées à la zone de rusticité souhaitée;
- Filtrer pour ne retenir que les espèces qui sont adaptées au climat futur;
- Filtrer pour éliminer les espèces sensibles au sel de déglacage;
- Trier les espèces par classe de déploiement;
- Trier les espèces par rang relatif du service écosystémique choisi.

Cet exercice permet d'obtenir une liste d'espèces potentiellement intéressantes et classées par rang de service écosystémique. La sélection finale des espèces parmi cette liste doit ensuite tenir compte de la diversité fonctionnelle (pour plus de détails, consultez Cameron et Paquette, 2020; Bérubé-Girouard et Royer-Tardif 2023). L'objectif est d'avoir, dans le projet de verdissement, une représentation du plus grand nombre possible de groupes fonctionnels différents et d'éviter la surreprésentation de certains, tout en privilégiant les meilleurs rangs de services écosystémiques. Il peut donc être complexe de respecter une répartition relativement équivalente des genres ou des groupes fonctionnels avec les contraintes présentées précédemment. C'est pour cela que les espèces aux rangs les plus bas sont généralement moins représentées en nombre d'arbres, mais sont néanmoins présentes, car elles permettent parfois d'aller chercher une diversité supplémentaire.

Le tableau 1 présente les espèces retenues dans le scénario maximisant trois services pour le site de Beauclerk (la captation des polluants atmosphériques, la séquestration du carbone et la réduction du ruissellement des eaux de pluie). Les illustrations de la répartition des genres et des groupes fonctionnels présentées dans les figures 4 et 5 permettent de constater que le projet de verdissement présente une diversité satisfaisante : il comporte en effet 19 genres différents dont la grande majorité occupe moins de 10 %.

De plus, les 10 groupes fonctionnels de la classification de Cameron et Paquette (2020) sont représentés et la plupart regroupent entre 5 et 15 % des arbres. Seul un groupe est sous-représenté avec 2 % et deux sont surreprésentés avec 16 et 18 %.



Espèce	Genre	Déploiement ¹	Rang relatif i-Tree ²	Groupe fonctionnel	Nombre d'arbres à planter
<i>Aesculus glabra</i>	<i>Aesculus</i>	P	28	2B	12
<i>Betula populifolia</i>	<i>Betula</i>		115	5	6
<i>Juniperus virginiana</i>	<i>Juniperus</i>		150	1B	15
<i>Malus ioensis</i>	<i>Malus</i>		153	3B	11
<i>Sorbus aucuparia</i>	<i>Sorbus</i>		157	3A	7
<i>Celtis occidentalis</i>	<i>Celtis</i>	M	13	2C	12
<i>Populus deltoides</i>	<i>Populus</i>		34	5	6
<i>Abies concolor</i>	<i>Abies</i>		40	1A	4
<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Robinia</i>		77	4B	4
<i>Populus grandidentata</i>	<i>Populus</i>		80	5	1
<i>Ostrya virginiana</i>	<i>Ostrya</i>		89	2A	3
<i>Picea pungens</i>	<i>Picea</i>		97	1A	2
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Alnus</i>		104	5	3
<i>Pinus nigra</i>	<i>Pinus</i>		139	1B	2
<i>Populus tremuloides</i>	<i>Populus</i>		145	5	1
<i>Ulmus americana - DED resis.</i>	<i>Ulmus</i>	G	1	2C	6
<i>Betula alleghaniensis</i>	<i>Betula</i>		3	2C	4
<i>Aesculus hippocastanum</i>	<i>Aesculus</i>		8	2B	1
<i>Picea abies</i>	<i>Picea</i>		11	1A	5
<i>Prunus serotina</i>	<i>Prunus</i>		19	3B	3
<i>Juglans nigra</i>	<i>Juglans</i>		20	4A	2
<i>Ulmus pumila - DED resis.</i>	<i>Ulmus</i>		30	3B	1
<i>Betula lenta</i>	<i>Betula</i>		33	5	1
<i>Pinus ponderosa</i>	<i>Pinus</i>		35	1B	2
<i>Gymnocladus dioicus</i>	<i>Gymnocladus</i>		43	4B	2
<i>Quercus palustris</i>	<i>Quercus</i>		70	4A	1
<i>Quercus rubra</i>	<i>Quercus</i>		83	4A	1
<i>Quercus coccinea</i>	<i>Quercus</i>		88	3A	1
<i>Quercus alba</i>	<i>Quercus</i>		96	4A	1
<i>Quercus bicolor</i>	<i>Quercus</i>		103	4A	1
<i>Salix alba</i>	<i>Salix</i>		106	5	1
<i>Pinus rigida</i>	<i>Pinus</i>		109	1B	1
<i>Quercus macrocarpa</i>	<i>Quercus</i>		112	4A	1
<i>Quercus imbricaria</i>	<i>Quercus</i>		119	4A	1
<i>Quercus ellipsoidalis</i>	<i>Quercus</i>		122	4A	1

¹P petit déploiement; M : moyen déploiement; G : grand déploiement

²rang relatif sur une échelle de 1 à 383

TABEAU 1: Liste des espèces retenues pour le projet de verdissement du site de Beauclerk

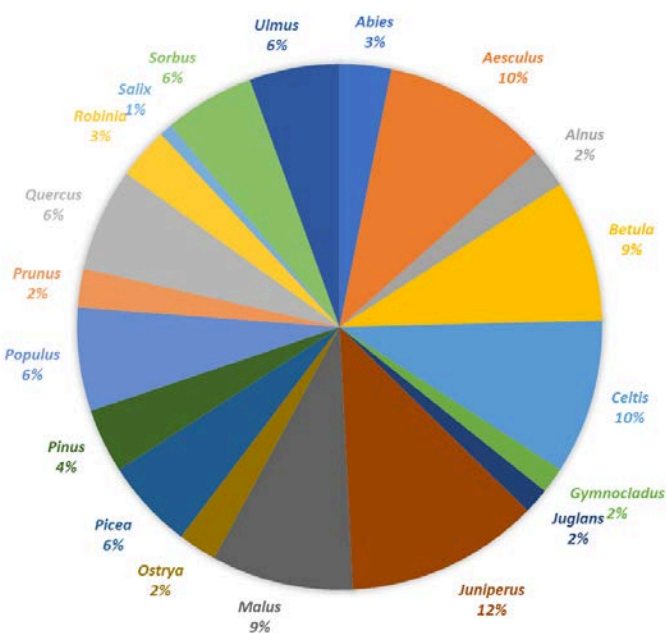


FIGURE 4. Proportions occupées par les différents genres dans le projet de verdissement du site de Beauclerk

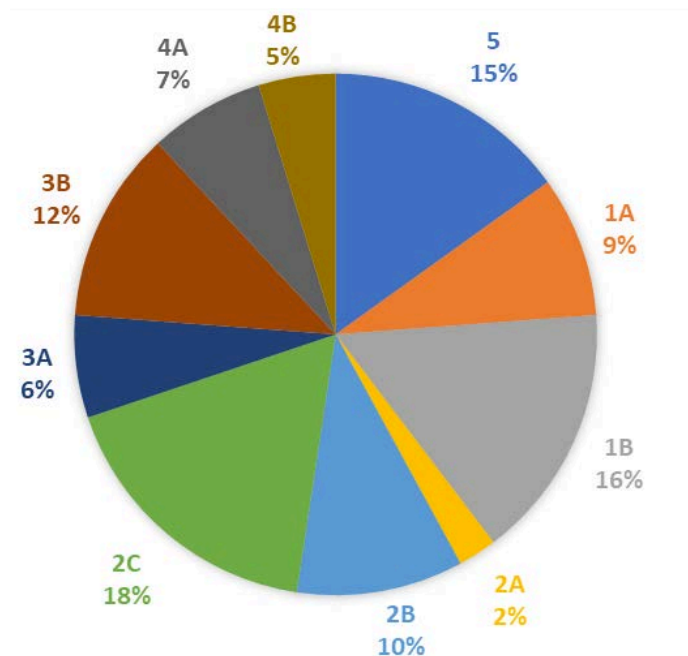


FIGURE 5. Proportions occupées par les différents groupes fonctionnels dans le projet du site de Beauclerk

ÉTAPE 4 : QUANTIFICATION DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES RENDUS

Les arbres rendent peu de services écosystémiques pendant leurs premières années de vie. De nombreux services, tels que la capture de la pollution ou du carbone, l'interception d'eaux pluviales ou la lutte contre les îlots de chaleur, sont en partie liés à la taille de couronne et du feuillage des arbres. En conséquence, les arbres atteignent leur plein potentiel en termes de services rendus une fois qu'ils sont matures. Un exercice préalable au calcul des services écosystémiques est donc de prédire la taille des arbres à un âge donné. Pour réaliser cet exercice complexe, les équations de croissance développées dans l'article de Wood et Dupras (2021) ont été utilisées. Ces équations permettent de réaliser des prédictions pour la plupart des espèces situées dans la région de Québec. La période de prédiction s'étend cependant sur 20 ans seulement. Actuellement, il n'existe aucune autre donnée scientifique fiable permettant de prédire la taille des arbres sur une plus longue période.

Une fois la taille des arbres obtenue à l'âge de 20 ans pour tous les arbres inclus dans le projet de verdissement, elles sont préparées afin d'être importées dans le logiciel *i-Tree Eco v6* de la suite de logiciels gratuits *i-Tree*. Ceci permet d'estimer la valeur des services écosystémiques rendus par l'ensemble des arbres du projet de verdissement. Le tableau 2 présente une synthèse des estimations calculées pour chacun des trois services visés. Les valeurs présentées sont dans tous les cas des estimations de services rendus par année, à l'exception du stock de carbone qui est calculé sur la période de 20 ans. Les valeurs demeurent faibles, mais il faut considérer que les arbres ne sont âgés que de 20 ans, qu'ils sont encore en pleine croissance et n'ont pas atteint leur maturité où ils exprimeront leur plein potentiel à remplir les services écosystémiques.



Services écosystémiques		Quantité	Valeur financière estimée
Polluants atmosphériques captés (kg/an)	PM _{2,5}	0,21	68,48 \$/an
	O ₃	4,59	
	NO ₂	0,51	
	SO ₂	0,06	
	CO	0,08	
	Total	5,44	
COV émis (kg/an)		3	-
Carbone	Stock (t de C sur 20 ans)	8,7	59,33 \$/20 ans*
	Séquestration (t de C/an)	0,3	
Ruissellement évité (m ³ /an)		39,5	91,83 \$/an

TABLEAU 2 : Quantification des services écosystémiques rendus par le projet de verdissement du site de Beauclerk à l'âge de 20 ans et valeur financière associée telle que fournie par le logiciel *i-Tree Eco*

LIMITES ET PRESPECTIVES DE L'APPROCHE

La démarche proposée a été développée à partir de six cas réels de verdissement qui couvrent des problématiques très diverses. Elle propose une vision intégrative et collaborative visant à bâtir des lignes directrices d'implantation des projets de verdissement. Par ailleurs, elle est assez agile et personnalisable pour s'adapter aux enjeux spécifiques d'une diversité de sites en milieu urbain (par exemple : des parcs, des rues, des stationnements ou des environs de bâtiment). Elle reste toutefois perfectible et gagnera encore en qualité lors de développements futurs.

L'une des limites des résultats produits provient de l'horizon temporel possible pour réaliser les prédictions des services écosystémiques rendus. En effet, les valeurs des services écosystémiques reposent en grande partie sur l'estimation de la taille des arbres; et les services atteignent leur plein potentiel lorsque les arbres ont atteint leurs dimensions maximales (ce qui peut arriver à des âges différents selon l'espèce). Actuellement, il est possible de prédire les métriques des arbres à 20 ans seulement puisqu'il existe encore peu de données permettant de prédire la croissance des arbres en milieu urbain au Québec. Une projection dépassant cette limite de 20 années serait une avancée importante.

D'autres limites de cette approche concernent l'utilisation du logiciel *i-Tree*. Ce logiciel a été développé aux États-Unis et n'est pas encore parfaitement calibré pour le Québec. Par exemple, l'application *i-Tree species* ne fonctionne pas pour toutes les villes québécoises, de sorte qu'il est nécessaire de passer par des villes américaines au climat similaire pour obtenir une liste d'espèces applicables au contexte québécois. De plus, ce logiciel se base beaucoup sur des données d'espèces croissant en milieu forestier naturel lorsque l'information n'est pas disponible pour le milieu urbain. Ce fait peut biaiser les estimations de services écosystémiques considérant que le milieu de croissance influence la taille et l'architecture des arbres. Le calcul de la valeur financière des services est aussi à considérer avec prudence, car l'utilisateur d'*i-Tree Eco* a peu de contrôle sur les paramètres de calcul et ceux-ci ne sont pas systématiquement ajustés au contexte local. Néanmoins, le CERFO travaille le MELCCFP à faciliter et améliorer l'utilisation de ce logiciel dans le contexte québécois. Il a produit un guide d'utilisation du logiciel en français (Gauthray-Guyenet *et al.*, 2023b) en plus de permettre la mise à jour dans le logiciel des données de pollutions atmosphériques pour les stations du Québec.

Finalement, dans une perspective plus large et considérant que les arbres en milieu urbain remplissent une diversité de services, il serait très pertinent de réaliser des démarches similaires de verdissement en lien avec d'autres services. On peut nommer par exemple les services rendus par les arbres dans la lutte contre les îlots de chaleur urbains ou encore pour le maintien de la biodiversité.

* Valeur estimée d'après le prix de la tonne de carbone sur le marché règlementaire du Québec et non par *i-Tree Eco*



Principales références

Bérubé-Girouard, V., Royer-Tardif, S., 2023. Comment favoriser la diversité des forêts pour une meilleure résilience : l'approche par traits fonctionnels. Le Progrès forestier. Édition D'été 2023 12-15.

Cameron, E., Paquette, A., 2020. L'approche fonctionnelle - Méthodologie et guide d'utilisation – Formation créditée.

Gauthray-Guyénet, V., Boulfroy, E., Royer-Tardif, S. et Fortin, H. 2024. Où, quoi et comment planter pour accroître les services écosystémiques de la forêt urbaine. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO) et Nature Québec. Note technique 2024-02. 20 pages.

Gauthray-Guyénet, V., Boulfroy, E., Royer-Tardif, S., Fortin, H., Béland, M., 2023a. Efficacité du verdissement face à la captation de polluants atmosphériques dans le contexte des changements climatiques et de présence d'îlots de chaleur - Analyse des études de cas. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO) et Nature Québec. Rapport 2023-20. 144 pages + 2 annexes.

Gauthray-Guyénet, V., Splawinski, T., Royer-Tardif, S., Boulfroy, E., 2023b. Quantification des services écosystémiques offerts par les forêts urbaines : Guide d'utilisation d'I-Tree (Guide d'utilisation logiciel No. 2023-16). Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2023-16. 91 pages + 3 annexes.

Wood, S.L.R., Dupras, J., 2021. Increasing functional diversity of the urban canopy for climate resilience: Potential tradeoffs with ecosystem services? Urban For. Urban Green. 58, 126972.

Nous remercions vivement les représentants des villes qui ont accepté de participer au projet et qui ont montré une grande disponibilité lors des différents échanges : Patricia Collettere de la ville de Québec, Carline Ghazal de Victoriaville, Nina Caudal de la ville de Montréal, arrondissement de Lachine et Geneviève Dufresne, Thierry Sénécal et Marie-Ève Perreault de la ville de Montréal, arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement les personnes qui ont apporté leur support, leurs commentaires et leurs suggestions tout au long de la réalisation des études de cas. Il s'agit de Frédéric Morneau-Vaillancourt, Véronique Parent-Lacharité et Camille Robitaille-Bérubé du MELCCFP, Marie Lapointe de l'INSPQ ainsi que Hubert Fortin, Mathieu Béland et Samuel Charlebois de Nature Québec.

Ce projet n'aurait pu avoir lieu sans le financement alloué par la direction des politiques de l'atmosphère du MELCCFP.



FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTERIE

Tél. : (418) 659-4225
Courriel : info@cerfo.qc.ca



Communiquez avec notre équipe du CERFO :

Vincent Gauthray-Guyénet, Ph. D.

Emmanuelle Boulfroy, M. Sc.

Samuel Royer-Tardif, Ph. D.