



LE RÔLE DES INFRASTRUCTURES NATURELLES DANS LA PRÉVENTION DES INONDATIONS DANS LA COMMUNAUTÉ MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL

4,3 millions de dollars de services
écosystémiques rendus par 400 000 arbres

SOMMET SUR LES
INFRASTRUCTURES
NATURELLES
PHYTOTECHNOLOGIES

ORGANISATEUR



FONDATION
DAVID SUZUKI
Un monde. Une nature.

NOS PARTENAIRES



SOCIÉTÉ
QUÉBÉCOISE DE
PHYTO
TECHNOLOGIE



Nature-Action
QUÉBEC

*LE RÔLE DES INFRASTRUCTURES NATURELLES
DANS LA PRÉVENTION DES INONDATIONS DANS
LA COMMUNAUTÉ MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL*

23 Novembre 2018



Sommaire	1
1. Introduction	3
2. Le rôle des arbres urbains publics dans la prévention des inondations sur l'île de Montréal	12
Description de la méthode d'analyse et des données utilisées	13
Contribution des arbres urbains publics en services écosystémiques	15
Recommandations	22
3. Le rôle des milieux naturels dans la prévention des inondations au sein de la Communauté métropolitaine de Montréal	25
Description de la méthode d'analyse et des données utilisées	26
Réduction des eaux de ruissellement	26
Conservation de la biodiversité	29
Réduction des effets liés aux îlots de chaleur urbains	31
Identification des zones prioritaires à la conservation spatiale selon chaque service écosystémique (objectif unique)	32
Réduction des eaux de ruissellement	32
Conservation de la biodiversité	33
Réduction des effets liés aux îlots de chaleur urbains	34
Recommandations	41
4. Conclusion	43
Références	45

AUTEURS :

Fanny Maure¹, Bronwyn Rayfield², Kyle T. Martins³, Cornelia Garbe⁴, Jérôme Dupras², Jeffrey Auclair², Sylvia Wood², Christian Messier^{1,2}, Marie Larocque¹, Andrew Gonzalez³.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Louise Hénault-Ethier, Sylvain Perron et Karel Mayrand de la Fondation David Suzuki pour leurs commentaires et leurs révisions. Nous remercions également toutes les municipalités qui ont accepté de partager leurs données d'inventaire : Baie-D'Urfé, Côte-Saint-Luc, Dollard-des-Ormeaux, Dorval, Hampstead, Kirkland, Montréal, Montréal-Est, Mont-Royal, Pointe-Claire et Westmount.

AVERTISSEMENT

Le contenu de cette étude est la responsabilité de ses auteurs et ne reflète pas nécessairement les vues et les opinions des personnes dont la contribution est soulignée ci-dessus. Tous les efforts pour assurer l'exactitude des informations contenues dans cette étude ont été déployés. Nous demeurons ouverts aux suggestions d'améliorations qui pourraient être incorporées dans les éditions ultérieures de cette étude.

Design graphique : Nadene Rehnby and Pete Tuepah, handsonpublications.com

¹ Université du Québec à Montréal;

² Institut des sciences de la forêt tempérée, Université du Québec en Outaouais;

³ Université McGill;

⁴ Eco²Urb

Liste des figures

Figure 1. La petite maison blanche à Chicoutimi, dans le secteur du Bassin, seule habitation restée debout à la suite du déluge du Saguenay en juillet 1996.	3
Figure 2. Illustration du niveau des eaux à Oka lors des inondations au printemps 2017.	5
Figure 3. Portrait des niveaux de précipitations annuelles observés (1981-2010) et projetés (2041-2070) selon le scénario d'émissions élevées de GES pour le sud du Québec (tiré de <i>Portraits climatiques</i> , Ouranos, 2018).	6
Figure 4. Infrastructures naturelles, soit un réseau interconnecté d'espaces verts et bleus fournissant des bénéfices aux populations humaines, au sein du Jardin botanique de Montréal.	8
Figure 5. Progression de l'étalement urbain à Montréal entre 1951 et 2011 (tiré de Nazarnia et al. [2016])	9
Figure 6. Précipitations annuelles observées (depuis 1950) et projetées (jusqu'en 2100) dans les régions de Laval et de Montréal selon deux scénarios d'émissions de GES (tiré de <i>Portraits climatiques</i> , Ouranos, 2018).	12
Figure 7. Cartes illustrant les différents services écosystémiques produits par les arbres urbains publics au sein de l'île de Montréal, représentés par municipalité de l'agglomération de Montréal et par arrondissement de la Ville de Montréal.	16
Figure 8. Carte illustrant la contribution globale des IN en services écosystémiques sur l'île de Montréal. Les services et indices analysés comprennent : l'évitement des eaux de ruissellement, la séquestration annuelle et le stockage total de carbone, la réduction de la pollution, la couverture de la canopée, l'évapotranspiration, le nombre d'arbres, la diversité fonctionnelle et la richesse spécifique.	21
Figure 9. Carte illustrant les différentes sources de données utilisées afin de parvenir à délimiter les zones inondables sur le territoire de la CMM.	28
Figure 10. Carte des zones à risque d'inondation au sein de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM).	28
Figure 11. Cartes illustrant les données utilisées dans le processus d'identification de zones prioritaires à la conservation suivant le principe de conservation de la biodiversité. Ces données incluent la qualité de l'habitat, la connectivité de l'habitat et les conditions climatiques favorables aux 14 espèces de vertébrés sélectionnées pour l'analyse.	30
Figure 12. Cartes illustrant la localisation des îlots de chaleur et des îlots de fraîcheur au sein du territoire de la CMM.	31

Figure 13. Carte de hiérarchisation des IN selon leur contribution dans la prévention des inondations sur le territoire de la CMM. Sur cette carte, le territoire a été divisé en un ensemble fin de pixels et ces pixels sont ensuite classés selon leur importance (pointage total des pixels) dans le réseau d'IN en termes de réduction des eaux de ruissellement.	33
Figure 14. Carte de hiérarchisation des IN selon leur contribution dans la conservation de la biodiversité sur le territoire de la CMM. Sur cette carte, le territoire a été divisé en un ensemble fin de pixels et ces pixels sont ensuite classés selon leur importance (pointage total des pixels) dans le réseau d'IN en termes de conservation de la biodiversité.	34
Figure 15. Cartes de hiérarchisation des IN selon leur contribution dans la réduction des îlots de chaleur urbains. Sur cette carte, le territoire a été divisé en un ensemble fin de pixels et ces pixels sont ensuite classés selon leur importance (pointage total des pixels) dans le réseau d'IN en termes de réduction des îlots de chaleur urbains.	36
Figure 16. Carte de priorisation de conservation suivant une stratégie favorisant à la fois la réduction des risques d'inondation, la conservation de la biodiversité et la lutte aux îlots de chaleur.	38
Figure 17. Comparaison de la contribution des milieux naturels en services écosystémiques (diagrammes en pétale) selon trois niveaux de protection du territoire de la CMM (cartes) : a) 17 % de protection, b) 10 % de protection et c) 5 % de protection.	39

Liste des tableaux

Tableau 1. Résumé des valeurs unitaires et monétaires pour les services écosystémiques produits par les 413 297 arbres urbains publics analysés sur l'île de Montréal.	17
---	----

Liste des sigles

CEHQ : Centre d'expertise hydrique du Québec

CERFO : Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy Inc

CMM : Communauté métropolitaine de Montréal

DHP : Diamètre à hauteur de poitrine

GES : Gaz à effet de serre

IG : Infrastructure grise

IN : Infrastructure naturelle

OMM : Organisation météorologique mondiale

PDCC : Programme de détermination des cotes de crues

PMAD : Plan métropolitain d'aménagement et de développement

Glossaire

Bande riveraine végétalisée (ou ripisylve) : ensemble décrivant les formations boisées (arbres, arbustes, buissons) qui se trouvent aux abords d'un cours d'eau. L'absence de bande riveraine végétalisée favorise l'érosion et le déplacement du cours d'eau.

Biodiversité : diversité des écosystèmes, des espèces et des gènes dans l'espace et dans le temps, ainsi que les interactions au sein et entre ces niveaux d'organisation.

Connectivité : constituée de deux composantes interreliées; la connectivité spatiale (les IN sont connectées dans l'espace) et fonctionnelle (les IN sont connectées en fonction du comportement des organismes face aux différents types d'usage des sols constituant la matrice du territoire) (Tischendorf and Fahrig, 2000).

Infrastructure grise : infrastructure basée sur des technologies, du bâti ou des activités humaines et n'impliquant pas la nature, telle que égouts, aqueducs et routes.

Infrastructure naturelle : définie comme un réseau interconnecté d'espaces verts et bleus qui préservent les valeurs et les fonctions des écosystèmes naturels en fournissant des bénéfices aux populations humaines (Benedict & McMahon, 2006; Austin, 2014; Rayfield et al., 2015). Souvent désignée par « infrastructure verte ».

Résilience : capacité d'un système à absorber une ou des perturbations environnementales sans se modifier ou à se réorganiser rapidement afin de maintenir ses principaux services et fonctions.

Richesse spécifique : nombres d'espèces présentes dans une zone donnée.

Richesse spécifique raréfiée : nombre d'espèces atteint par extrapolation pour un nombre fixe d'arbres. Ainsi, la richesse spécifique raréfiée ne reflète pas le nombre d'espèces actuellement présentes dans une zone donnée (c.-à-d. la richesse spécifique), mais permet une comparaison des données lorsque les groupes que l'on compare ont des effectifs d'arbres très hétérogènes. Voir l'étude de Chao & Jost (2012) pour plus de détails sur cette méthode.

Services écosystémiques : biens et services fournis par les écosystèmes (naturels et semi-naturels) et dont bénéficient tous les êtres humains. Ces services incluent les services d'approvisionnement (nourriture, eau, combustible, fibres, etc.), les services de régulation (climat, érosion, maladies, etc.), les services culturels (bénéfices sur les plans récréatifs, esthétiques et spirituels) et les services de support (formation des sols, production primaire, air respirable, etc.) (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Surverse : excédent d'eau provenant des réseaux d'égouts, combinant des eaux de pluie et des eaux usées, qui ne peut être dirigé vers la station d'épuration lorsque celle-ci est saturée ou au maximum de sa capacité, par exemple au moment de la fonte des neiges, de pluies abondantes ou d'inondations (MDDELCC, 2018).



Sommaire

Sommaire

Que ce soit à l'échelle d'une rue, d'un parc ou de la ceinture verte de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM), les infrastructures naturelles (IN) situées en zones urbaines contribuent au bien-être, à la qualité de vie et à la santé des citoyens du fait des nombreux services qu'elles fournissent. Bien que ces services nous soient essentiels, de nombreuses pressions menacent les IN présentes sur le territoire de la CMM, telles que la pollution ou encore l'étalement urbain. Si nous souhaitons encore profiter des bénéfiques apportés par les écosystèmes naturels qui nous entourent, nous devons désormais assurer leur protection sur le long terme.

Cette étude évalue le rôle que jouent les IN dans la prévention des inondations et d'autres services écosystémiques tels que la conservation de la biodiversité, la lutte aux îlots de chaleur et la régulation du carbone. Réalisées aux échelles de l'île de Montréal et de la CMM, les analyses permettent de mieux comprendre i) la contribution des arbres urbains publics, en se basant sur des données d'inventaire des arbres publics et la production de services écosystémiques fournis par arbre et ii) la contribution des milieux naturels de la trame verte, où l'évaluation est réalisée à plus grande échelle, en se basant sur les caractéristiques et la localisation des milieux naturels au sein du territoire. Afin de favoriser la protection de ces IN à grande échelle, nous proposons aussi une stratégie de planification territoriale permettant de conserver un réseau robuste et durable d'IN, capable de maintenir l'essentiel de la production en services écosystémiques dont nous dépendons largement. L'approche proposée vise la planification de la conservation d'au moins 17 % du territoire de la CMM, un des objectifs à court terme ciblés dans le Plan métropolitain d'aménagement et de développement (PMAD) de la CMM.

Nous montrons dans cette étude que :

- Les arbres urbains publics de l'île de Montréal fournissent l'équivalent de plus de 4 millions de dollars par année en évitement (par captation) des eaux de ruissellement, séquestration et stockage du carbone et réduction de la pollution;
- À l'échelle de la CMM, bien qu'il soit encore difficile d'estimer un équivalent monétaire des services écosystémiques produits par les milieux naturels, ces IN contribuent grandement à la captation des eaux de ruissellement, la lutte aux îlots de chaleur et la conservation de la biodiversité. Une planification visant la protection d'au moins 17 % du territoire de la CMM, tel que ciblée dans le PMAD, est toutefois le seuil minimum à viser à court terme, car bien qu'il maintienne l'efficacité de certains services, il ne suffit pas à maintenir l'intégrité des milieux naturels de la CMM;

- Toutes les IN ne contribuent pas de la même façon à la production de services écosystémiques et leur diversité assure une complémentarité et une meilleure efficacité dans les services fournis;
- L'approvisionnement en services écosystémiques dont nous dépendons tant pour notre qualité de vie, notre bien-être et notre santé repose en grande partie sur l'agencement spatial des IN au sein du territoire, leur diversité spécifique et fonctionnelle, ainsi que leur connectivité. Pour assurer leur pleine efficacité et leur résilience, les IN doivent être diversifiées et intégrées à des aménagements en réseaux, basés sur la connectivité spatiale et fonctionnelle des IN;
- Une densification du couvert arboricole de la CMM et de l'île de Montréal est nécessaire afin d'augmenter la production des services écosystémiques et ainsi mieux contrer les effets négatifs de l'anthropisation et des changements globaux. Une telle mesure permettrait aussi d'améliorer la diversité de la flore et de la faune régionale.

Ainsi, en misant sur une planification en réseaux, axée sur la diversité et l'efficacité des IN, la CMM pourrait mieux répondre aux besoins de ses citoyens et notamment augmenter de façon durable et rentable (économiquement) la résilience des milieux anthropisés face aux changements globaux.

1. Introduction

Le Québec est caractérisé par la présence de nombreux cours d'eau qui, en plus de façonner le paysage, sont source d'une grande richesse grâce aux nombreux bénéfices écologiques, culturels et économiques qu'ils fournissent à notre société. Par ailleurs, du fait de cette caractéristique dans son territoire, le Québec a aussi connu des événements d'inondations tout au long de son histoire. Nous rappelons à cet effet les inondations majeures qui sont survenues au cours des années 1974 et 1976 dans plusieurs régions du Québec, ou encore le déluge du Saguenay en 1996 (figure 1). Plus localement, le 14 juillet 1987, un véritable déluge s'abattait sur Montréal avec plus de 100 mm de pluies diluviennes en un peu plus d'une heure : plusieurs rues se sont transformées en rivière, l'autoroute Décarie s'est transformée en canal recouvert par 3,5 m d'eau, 40 000 maisons ont été inondées et les dommages se sont élevés à un demi-milliard de dollars¹.

Figure 1. La petite maison blanche à Chicoutimi, dans le secteur du Bassin, seule habitation restée debout à la suite du déluge du Saguenay en juillet 1996.



Photo : Louise Hénault-Ethier

¹ <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1045083/30-ans-deluge-montreal-pluie-inondations-14-juillet-1987>

À la suite des inondations des années 1974 et 1976, le Gouvernement du Québec et le Gouvernement du Canada ont signé une entente sur les politiques à adopter afin de réduire les dommages causés par les inondations². La prévention s'avère la seule avenue possible et des solutions axées sur des mesures règlementaires ont été développées concurremment à l'amélioration des connaissances et à la délimitation des zones inondables. Pourtant, malgré tous ces investissements, le Québec a obtenu une note de C dans une récente étude portant sur la préparation des provinces canadiennes face aux inondations en contexte de changements climatiques (Feltmate, 2016).

« Durant les années 1950, 1960, 1970 et, dans une moindre mesure, 1980, le Gouvernement du Canada, de concert avec les provinces, a consacré des millions de dollars à l'aménagement de barrages et de digues pour lutter contre les inondations. En plus d'être très coûteux, ces ouvrages contribuent à créer un faux sentiment de sécurité et à favoriser l'accroissement du développement. Ainsi, malgré la construction d'ouvrages de protection, les dommages ont continué de s'accroître à un rythme impressionnant. Selon les renseignements obtenus, l'indemnisation des victimes d'inondations a coûté au Québec plus de 280 millions de dollars entre 1974 et 2004 ».

(Commission de l'aménagement de la CMM, 2017)

Les effets néfastes des inondations et l'importance de les prévenir ont été ramenés au premier plan dans la région métropolitaine de Montréal lorsque celle-ci a été frappée par deux inondations printanières exceptionnelles dans une période de seulement sept ans : les inondations de la rivière Richelieu en 2011 et celles de la rivière des Outaouais en 2017. En mai 2017, le dépassement du fleuve a atteint 120 cm au port de Montréal (CMM 2017) et cet épisode de pluies intenses a eu pour effet de causer des surverses et l'inondation de secteurs entiers dans la Communauté métropolitaine de Montréal. Selon Urgence Québec, les inondations de la rivière des Outaouais et du fleuve Saint-Laurent ont affecté 261 municipalités au Québec, avec près de 5 370 résidences principales inondées et plus de 4 000 personnes évacuées³ (figure 2).

² <https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/index.htm>

³ <https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/ministere/salle-presse/communiqués/detail/13780.html>

Figure 2. Illustration du niveau des eaux à Oka lors des inondations au printemps 2017.



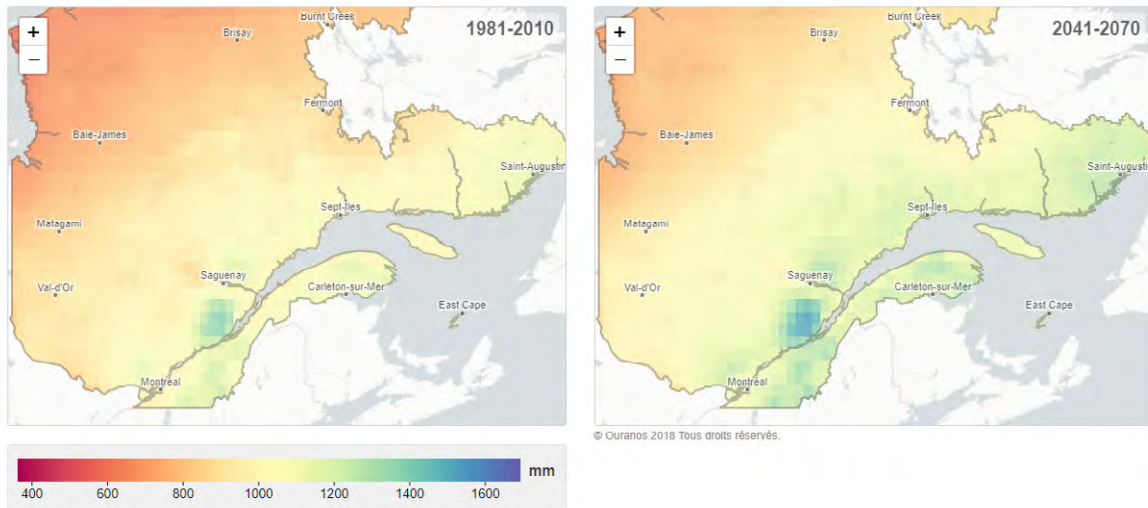
Photo : Marie-Pierre Auclair

De tels évènements mettent largement en lumière les limites des systèmes urbains actuels de gestion des eaux de ruissellement. Par exemple, lors du déluge de Montréal en 1987, plus de 100 mm de pluie sont tombés en un peu plus d'une heure, alors que le réseau d'égouts est prévu pour absorber 40 mm d'eau par heure. Or, dans le contexte actuel des changements globaux, et plus particulièrement des changements climatiques, il faut s'attendre à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des évènements climatiques extrêmes (GIEC⁴, ONU Environnement⁵), qu'il s'agisse de chaleurs accablantes, de pluies abondantes ou d'épisodes de redoux accélérés entraînant une fonte rapide du couvert neigeux (ce qui, sur sol encore gelé, peut conduire à des inondations telles que celles de la rivière des Outaouais en 2017). Bien que l'augmentation des températures à l'échelle du globe soit un des effets les plus souvent mentionnés, d'autres changements climatiques sont tout aussi préoccupants, tels que la hausse du niveau de précipitations. Pour le Québec, on s'attend entre autres à des hausses significatives pour tous les indices de précipitations abondantes et extrêmes, ainsi qu'à une augmentation de la quantité maximale annuelle des précipitations (Ouranos, 2015, 2018) (figure 3).

⁴ http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml

⁵ <https://www.unenvironment.org/fr/explore-topics/changement-climatique>

Figure 3. Portrait des niveaux de précipitations annuelles observés (1981-2010) et projetés (2041-2070) selon le scénario d'émissions élevées de GES pour le sud du Québec (tiré de *Portraits climatiques*, Ouranos, 2018).



Ces changements dans la configuration des précipitations vont probablement avoir des impacts majeurs dans la gestion de l'eau dans les zones urbaines puisque les infrastructures et systèmes ont été conçus sur la base des moyennes des précipitations passées. Ces changements sont d'autant plus préoccupants que les limites des systèmes actuels de gestion des eaux de ruissellement ont déjà été atteintes dans les dernières années. Ainsi, les débordements et les refoulements d'égouts seront plus fréquents dans le futur, causant une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des inondations. Or, les inondations représentent des coûts considérables aux niveaux social, environnemental et économique. À titre d'exemple, les indemnités aux victimes d'inondations ont coûté au Québec plus de 280 millions de dollars entre 1974 et 2004, 82 millions à la suite des inondations du printemps 2011 et, bien que le bilan continue de s'alourdir, près de 156 millions de dollars à la suite des inondations du printemps 2017. À ces chiffres s'ajoutent par ailleurs tous les dommages pour lesquels les victimes n'ont pas reçu d'indemnités. De plus, on notera les conséquences potentielles sur la santé des citoyens, telles que la transmission de maladies et l'exposition à des déchets et des polluants toxiques présents dans les eaux usées (McMichael et al., 2006), ainsi que les nombreuses conséquences psychologiques liées à de tels événements (p. ex., stress, dépression, séparation, suicide). Il est alors évident que nous devons repenser notre façon de prévenir les inondations.

Jusqu'à maintenant, nous avons principalement misé sur des approches dites « dures », soit des infrastructures grises (IG), c'est-à-dire des approches basées sur des technologies, du bâti ou des activités humaines et n'impliquant pas la nature (p. ex., égouts, aqueducs et routes). Ainsi, il en coûte par exemple un millier de dollars pour retenir un mètre cube d'eau de pluie dans des ouvrages bétonnés ou des conduites souterraines surdimensionnées (Houbart & Hénault-Ethier, 2018). Toutefois, leurs coûts importants de construction, leur inexorable dégradation physique avec le temps, le fait qu'elles ne servent qu'une seule fonction et bien souvent à temps partiel, ainsi que leur faible potentiel de résilience portent maintenant les spécialistes à envisager d'autres approches. Parmi ces nouvelles approches à favoriser, la communauté scientifique reconnaît désormais l'apport primordial des infrastructures naturelles, soit les milieux naturels et les aménagements végétalisés, pour favoriser l'atténuation des conséquences des extrêmes climatiques (Jones et al. 2012). De plus, la présence d'IN en milieux urbains améliore la résilience des écosystèmes, c'est-à-dire leur capacité à absorber une ou des perturbations environnementales sans se modifier ou à se réorganiser rapidement afin de maintenir leurs principaux services et fonctions. Enfin, dans bien des cas, les IN sont plus avantageuses sur le plan économique (Bassut, 2016).

Les infrastructures naturelles (IN) sont définies comme un réseau interconnecté d'espaces verts et bleus qui préservent les valeurs et les fonctions des écosystèmes naturels en fournissant des bénéfices aux populations humaines (Benedict & McMahon, 2006; Austin, 2014; Rayfield et al., 2015) (figure 4). Elles incluent principalement les arbres urbains, les parcs, les espaces verts, les forêts urbaines et les milieux humides, et ce, aussi bien dans les paysages naturels, urbains et agricoles de la région. Parmi les nombreux services écosystémiques fournis par ces IN, et particulièrement les milieux humides, la captation des eaux de pluie est primordiale pour atténuer la pression exercée sur le réseau d'égouts et ainsi éviter les surverses, soit l'écoulement des eaux de pluie et des eaux usées vers les cours d'eau récepteurs. Par ailleurs, de plus en plus de villes ont intégré avec succès les IN à leur planification et à l'aménagement de leur territoire et témoignent ainsi de l'effet significatif des IN sur l'augmentation de la résilience des milieux anthropisés (voir les exemples de Berlin, Barcelone et New York dans Rayfield et al., 2015; Sutton-Grier et al., 2015). En s'inspirant de la nature, ces villes deviennent donc de véritables « villes éponges » : elles retiennent l'eau de pluie plutôt que de l'évacuer dans les égouts et profitent ainsi, par temps chaud, d'un refroidissement naturel de l'environnement urbain par évaporation⁶. Dans plusieurs cas, ce sont des approches qui vont compléter ou même remplacer les infrastructures grises, en raison de leur flexibilité, de leur capacité à s'auto-entretenir, de leur efficacité au niveau des coûts et des multiples autres services écosystémiques qui y sont associés (Jones et al., 2012; World Bank, 2009; Rayfield et al., 2015).

⁶ <https://novae.ca/2018/03/les-villes-eponges-nouvelle-facon-de-penser-nos-milieux-urbains/>

Figure 4. Infrastructures naturelles, soit un réseau interconnecté d'espaces verts et bleus fournissant des bénéfices aux populations humaines, au sein du Jardin botanique de Montréal.

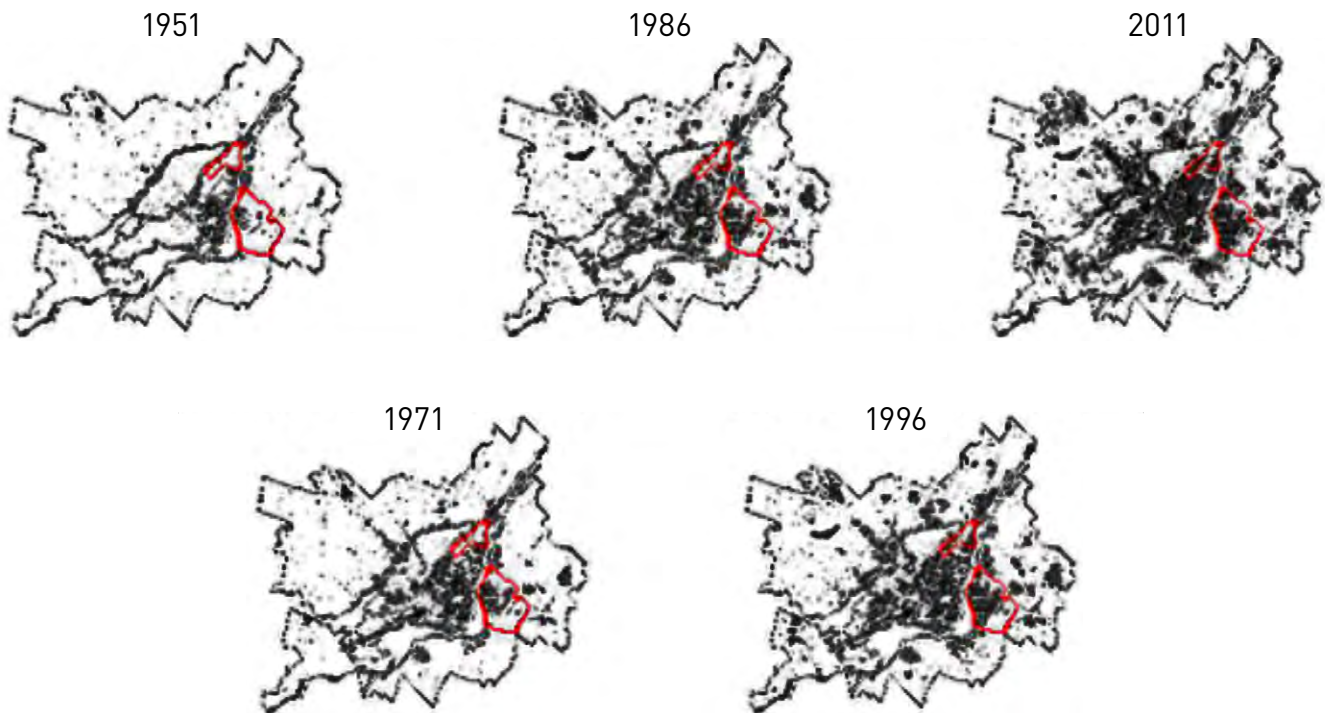


Photo : Mathieu B. Morin

La gestion des eaux de pluie en milieu urbain dépend donc en grande partie de l'abondance et du potentiel de captation des IN, mais également de leur connectivité au sein du réseau, soit de leur fonctionnement en tant que système intégré (MDDELCC, 2018b). Cette connectivité peut être spatiale (les IN sont connectées dans l'espace) et fonctionnelle (les IN sont connectées en fonction du comportement des organismes face aux différents types d'usage des sols constituant la matrice du territoire), deux composantes qui sont interreliées. La connectivité d'un écosystème peut être assurée par la constitution d'une trame verte et bleue (c.-à-d. d'un réseau connectant IN et milieux aquatiques) et ainsi, grâce à la proximité des milieux naturels complémentaires, il est possible d'optimiser la production de services écosystémiques (Mitchell et al., 2015; Poder et al., 2016; Gonzalez et al., 2017). À noter que cette connectivité est tout aussi importante entre les IN qu'entre les IN et le réseau hydrographique qui caractérise le paysage, et cet aspect représente un enjeu déterminant afin d'améliorer la résilience des milieux anthropisés aux changements climatiques⁷ (Jencso et al., 2009).

⁷ Les inondations peuvent être causées par de fortes pluies, mais aussi par des pluies hivernales en période de redoux (alors que les rivières sont encore gelées) et des pluies printanières lorsque le stock de neige est saturé en eau.

Figure 5. Progression de l'étalement urbain à Montréal entre 1951 et 2011 (tiré de Nazarnia et al. [2016]).



Pourtant, malgré les multiples bénéfices associés aux IN, celles-ci ont grandement diminué en quantité et en qualité dans les dernières décennies, et ce, principalement du fait de l'étalement urbain⁸. Par exemple, depuis les années 1950, l'étalement urbain s'accélère inexorablement dans le grand Montréal (figure 5; Nazarnia et al., 2016). Les IN ont ainsi diminué de moitié entre 1965 et 2010 au sein du territoire de la CMM (Dupras et al., 2015; Bissonnette et al., 2018) et on y enregistre une perte de 80 % de la connectivité écologique (Dupras et al., 2016a), signe d'une grande diminution de l'intégrité du territoire. Un constat qui s'explique en partie par le fait que la protection et l'aménagement des IN demeurent surtout régis par des interventions locales et ponctuelles dont l'efficacité est limitée à l'échelle régionale. De surcroît, un milieu naturel rapporte moins de taxes municipales qu'un terrain développé, ce qui incite les municipalités à céder des terres au développement pour assurer leur viabilité économique. Par ailleurs, la planification d'interventions de protection ou de développement d'IN se voit aussi freinée par le manque de données fiables sur les caractéristiques des paysages et sur leur contribution actuelle ou potentielle à de nombreux services écosystémiques (Bissonnette et al., 2018), ce qui inclut entre autres la gestion des eaux de ruissellement.

⁸ D'autres facteurs de stress fragilisent les IN tels que la pollution, les changements climatiques ou les espèces envahissantes (Dupras & Alam 2015).

L'objectif central de cette étude est de mieux comprendre les services écosystémiques que les IN fournissent naturellement à la société, dans l'optique de favoriser leur conservation, mais aussi leur expansion lors de la planification de nos aménagements urbains. Faisant suite aux deux épisodes d'inondations printanières exceptionnelles vécues au Québec aux printemps 2011 (rivière Richelieu) et 2017 (rivière des Outaouais), nous nous sommes particulièrement intéressés aux rôles que jouent les IN dans la prévention des inondations ou plus précisément dans l'évitement (par captation) des eaux de ruissellement, et ce, aussi bien à l'échelle de l'arbre urbain qu'à l'échelle des milieux naturels de la trame verte et bleue. Cela dit, les bénéfices fournis par les IN ne se limitant pas à ce seul service, notre étude évalue aussi, à différentes échelles, le rôle simultané des IN dans la production d'autres services écosystémiques essentiels incluant par exemple la réduction du carbone, l'amélioration de la qualité de l'air ou l'atténuation des îlots de chaleur.

En se basant sur une méthodologie d'analyse spatiale déjà bien développée (Rayfield et al., 2015), nous proposons une hiérarchisation des IN du territoire afin de cibler celles qui jouent un rôle prépondérant dans la production de différents services écosystémiques et dont il est donc crucial de conserver l'intégrité. Et puisque les IN contribuent à notre bien-être à petite et à grande échelle, notre étude dresse un portrait de leurs services à deux échelles du territoire : i) à l'échelle de l'arbre urbain public sur l'île de Montréal, en se basant sur des données d'inventaire des arbres publics et la production de services écosystémiques fournis par arbre, et ii) à l'échelle des milieux naturels de la CMM, où l'évaluation du rôle des IN est réalisée à plus grande échelle, en se basant sur les caractéristiques et la localisation des milieux naturels au sein du territoire⁹. L'étude se divise selon les deux sous-objectifs suivants :

- 1- À l'échelle de l'île de Montréal, évaluer le rôle que jouent les arbres urbains publics dans la réduction des risques d'inondation et estimer les autres services simultanés associés à ces IN en milieux fortement urbanisés.
- 2- À l'échelle de la CMM, évaluer le rôle que jouent les milieux naturels boisés dans la réduction des risques d'inondations et évaluer les bénéfices multiples associés à la protection des réseaux d'IN qui façonnent le territoire.

⁹ Au moment de la rédaction du présent rapport, aucune donnée d'inventaire n'était disponible pour l'ensemble du territoire de la CMM, incluant les milieux urbains et les milieux naturels.

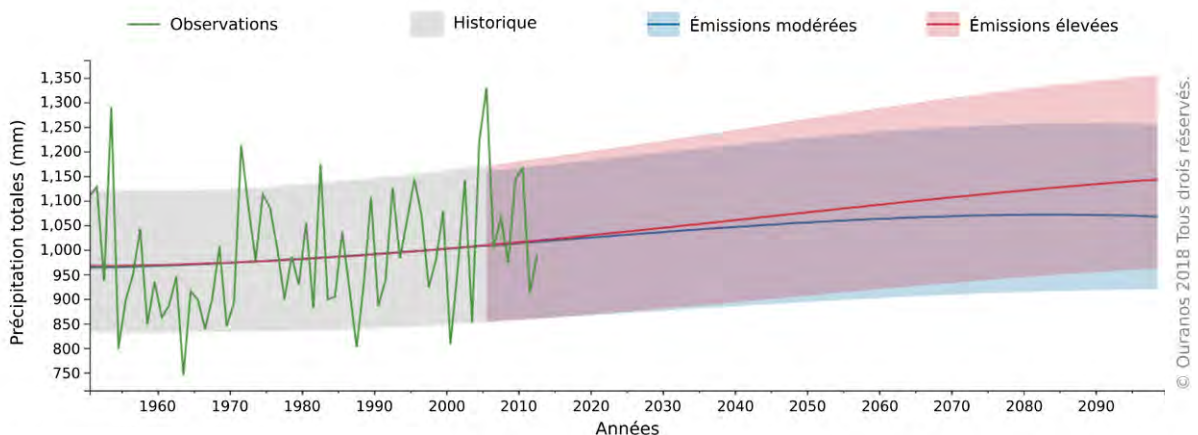


Le rôle des arbres urbains publics dans la prévention
des inondations sur l'île de Montréal

2. Le rôle des arbres urbains publics dans la prévention des inondations sur l'île de Montréal

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a de nombreux effets sur le climat et parmi les effets préoccupants anticipés, on annonce une modification du niveau de précipitations. Pour le Québec, on prévoit à l'horizon 2041-2070 une augmentation annuelle des précipitations variant de 8,9 % (scénario d'émissions modérées de GES) à 13,4 % (scénario d'émissions élevées de GES)¹⁰. L'augmentation la plus marquée est attendue pendant la saison hivernale où l'on prévoit 30-50 mm de pluie en plus, alors qu'une augmentation de 10-15 mm est attendue pour la saison estivale. Au niveau de la région de Montréal¹¹, cela représenterait une augmentation annuelle variant de 4,5 à 11 %, selon le scénario d'émission de GES privilégié (figure 6).

Figure 6. Précipitations annuelles observées (depuis 1950) et projetées (jusqu'en 2100) dans les régions de Laval et de Montréal selon deux scénarios d'émissions de GES (tiré de *Portraits climatiques*, Ouranos, 2018).



À cet égard, les arbres publics situés en zones urbaines (c.-à-d. arbres de rues, de parcs, d'espaces verts, de forêts urbaines et de milieux humides) rendent de nombreux services écosystémiques aux citoyens et ils jouent ainsi un rôle clé dans l'atténuation des effets liés aux changements climatiques. Bien que ces services soient grandement reconnus par la communauté scientifique qui encourage leur multiplication en milieux anthropisés (Paquette, 2016), le remplacement d'IG par des IN ou l'intégration de nouvelles IN au sein des aménagements urbains sont loin d'être systématiquement privilégiés lors des interventions. Ainsi, afin de mieux comprendre la

¹⁰ <https://www.ouranos.ca/portraitsclimatiques/#/regions/0>

¹¹ <https://www.ouranos.ca/portraitsclimatiques/#/regions/24>

contribution des arbres urbains à l'amélioration de notre qualité de vie et estimer la valeur des services écosystémiques qu'ils nous rendent naturellement, nous avons réalisé une analyse des arbres urbains publics¹² présents sur l'île de Montréal.

En se basant sur le logiciel i-Tree Eco v6¹³, développé par le Département d'Agriculture des États-Unis (USDA Forest Service, 2018), il est possible d'évaluer les services fournis par les arbres en contexte urbain, y compris l'évitement des eaux de ruissellement, la séquestration et le stockage de carbone, l'évapotranspiration (qui diminue la quantité d'eau qui ruissèle et par conséquent les risques de surverses) ou encore l'amélioration de la qualité de l'air. Tous ces services jouent un rôle clé pour la santé et le bien-être des individus et des communautés. De plus, toutes les espèces d'arbres ne produisant pas les mêmes services et ne répondant pas de la même façon aux stress environnementaux, la variété du couvert arboricole est aussi d'une grande importance au sein des villes afin d'assurer la pérennité et complémentarité des services écosystémiques, et ce, particulièrement dans le contexte des changements globaux.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE ET DES DONNÉES UTILISÉES

L'analyse des services écosystémiques a été réalisée sur un total de 413 297 arbres urbains publics géoréférencés sur l'île de Montréal. Ces arbres incluent ceux présents dans les rues et les parcs de 16 arrondissements de la Ville de Montréal : Ahuntsic-Cartierville, Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, Lachine, LaSalle, Plateau-Mont-Royal, Sud-Ouest, Mercier–Hochelaga-Maisonneuve, Montréal-Nord, Pierrefonds-Roxboro, Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Rosemont–La Petite-Patrie, Saint-Laurent, Saint-Léonard, Verdun, Ville-Marie et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension. De plus, ils incluent aussi les inventaires de Baie-D'Urfé, Côte-Saint-Luc, Dollard-des-Ormeaux, Dorval, Hampstead, Montréal-Est, Ville Mont-Royal, Pointe-Claire et Westmount. Les données d'inventaire ont été récupérées via le portail ouvert des villes ou alors partagées par les municipalités elles-mêmes¹⁴. À noter que les milieux naturels protégés de l'île de Montréal (figure 8) n'ont pas été inclus dans cette analyse par manque de données au moment de la rédaction du présent rapport.

¹² Les inventaires utilisés pour l'île de Montréal n'incluent pas les arbres privés.

¹³ <https://www.itreetools.org/eco/>

¹⁴ Les autres arrondissements et municipalités de l'agglomération de Montréal n'ont pu être inclus dans l'analyse par manque de données ou du fait de l'absence de mise à jour des données disponibles au moment de la rédaction du présent rapport.

L'estimation d'approvisionnement en services écosystémiques dans le logiciel i-Tree se base sur l'identification de l'espèce des arbres répertoriés, plusieurs mesures de leur structure aérienne ainsi que sur certains de leurs traits fonctionnels (c.-à-d. des traits liés à leurs caractéristiques biologiques comme l'indice de surface foliaire). Ainsi, une fois que chaque arbre de l'inventaire est identifié par un nom d'espèce, un emplacement géographique et un diamètre à hauteur de poitrine (DHP), les estimations de la structure aérienne et des traits fonctionnels associés sont calculées par le logiciel. À noter qu'en raison de l'hétérogénéité des données d'inventaire, certaines estimations ont dû être faites à partir du nom du genre uniquement. Les données météorologiques nécessaires à l'évaluation des services sont celles de la station de l'aéroport Pierre-Elliott Trudeau pour les années 2010 à 2013 (relevées par le *National Center for Environmental Information*). Les données relevées au cours de l'année 2010 ont été utilisées afin d'estimer l'amélioration de la qualité de l'air associée à la présence des arbres en ville (les données de pollution aérienne n'étaient pas disponibles pour les années suivantes) tandis que celles des années 2011 à 2013 ont permis de générer les moyennes annuelles pour le service d'évitement des eaux de ruissellement (aucune donnée climatique n'étant disponible pour 2010, il n'a pas été possible d'évaluer ce service). Les autres services générés par iTree incluent la séquestration annuelle et le stockage total de carbone et l'évapotranspiration pour chaque arbre du territoire; et ces estimations étant équivalentes entre 2010 et 2013, nous avons conservé uniquement les plus récentes, soit celles produites pour 2013.

L'ensemble des valeurs des services écosystémiques fournis par les arbres urbains a ainsi été cartographié sur le territoire de l'île de Montréal (dans les zones pour lesquelles des données étaient disponibles). Pour une représentation visuelle plus adaptée de la superposition de ces services, les données ont été converties en une image raster (matricielle) avec une résolution de 30 x 30 m. Nous avons aussi estimé la couverture de la canopée¹⁵ des arbres pour chaque pixel de la cartographie afin de cibler les zones au recouvrement élevé qui jouent un rôle important dans l'évapotranspiration des eaux lors de précipitations, mais aussi dans la lutte aux îlots de chaleur.

Étant donné qu'une forêt urbaine diversifiée remplit davantage de services écosystémiques et est moins susceptible aux stress et aux perturbations, notre analyse prend aussi en considération différents paramètres de diversité de la forêt urbaine. Ces paramètres incluent un indice de richesse spécifique (c.-à-d. le nombre d'espèces et

¹⁵ <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/canopee-2015>

hybrides présents) et un indice de diversité fonctionnelle (Laliberté & Legendre, 2010). Pour ce dernier indice, la diversité est évaluée en se basant sur les caractéristiques biologiques des arbres (autrement dit leurs traits fonctionnels) plutôt que sur le nom de l'espèce et donc leur classification phylogénique. Puisque ces caractéristiques biologiques affectent la performance individuelle d'un organisme, elles sont aussi directement liées à la façon dont un arbre va répondre et s'adapter à un ou plusieurs facteurs environnementaux. Évaluant ainsi les arbres selon leurs traits fonctionnels, l'indice nous permet d'évaluer la diversité fonctionnelle du territoire arboricole (voir Paquette, 2016 pour plus de détails).

Finalement, afin d'évaluer la contribution globale des arbres urbains, l'ensemble des données relatives aux différents services analysés a été regroupé sur une même carte, divisée par arrondissement de Montréal et municipalité. Pour faciliter la superposition des données, chaque valeur a au préalable été standardisée pour être comprise dans une échelle entre 0 et 1. Toutes les variables ont ensuite été additionnées (avec le même poids) afin de déterminer les IN produisant le plus de services écosystémiques.

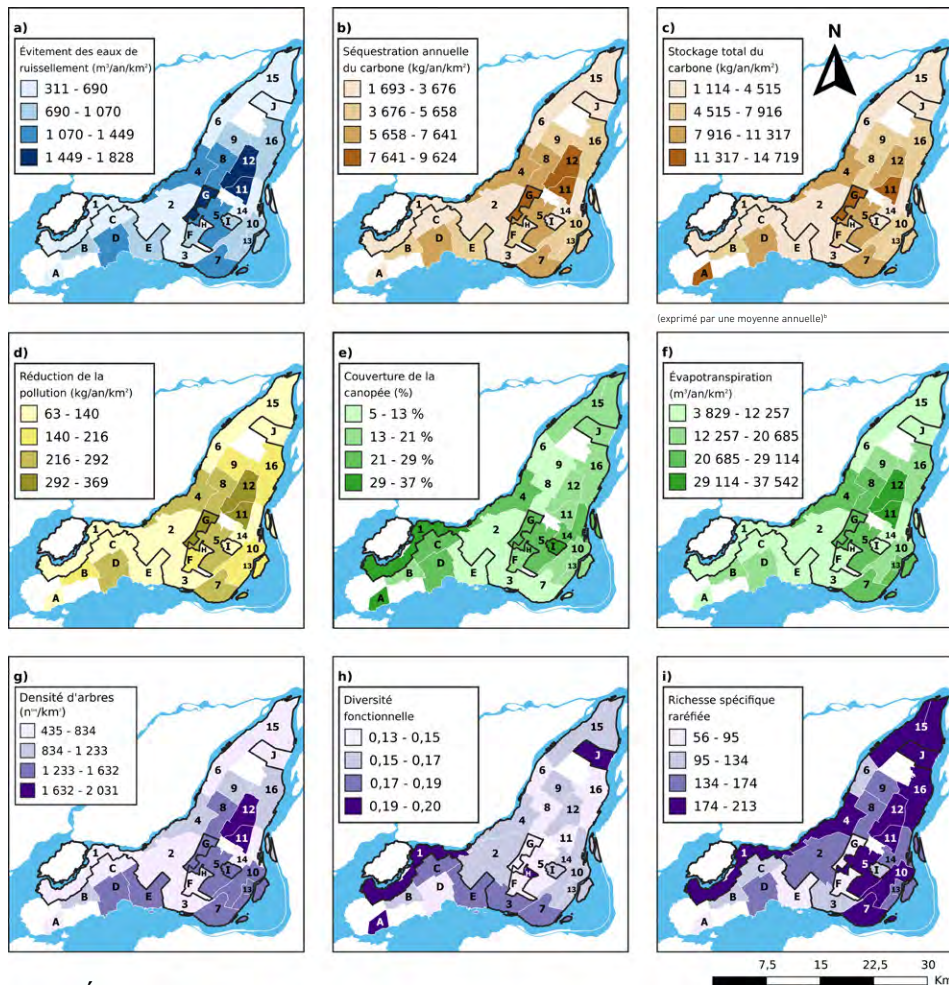
CONTRIBUTION DES ARBRES URBAINS PUBLICS EN SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Tout d'abord, la figure 7 illustre la production des arbres urbains publics en services écosystémiques pour chaque municipalité de l'agglomération de Montréal et chaque arrondissement de la Ville de Montréal. Les services présentés sont : l'évitement des eaux de ruissellement, la séquestration annuelle et stockage total de carbone¹⁶, l'amélioration de la qualité de l'air, la couverture de la canopée, l'évapotranspiration et la diversité du couvert arboricole (y compris la densité d'arbres, la diversité fonctionnelle et la richesse spécifique raréfiée¹⁷). Pour les détails de chaque municipalité ou arrondissement, le lecteur peut consulter les annexes du rapport en ligne.

¹⁶ Alors que la séquestration de carbone fait référence au processus de capture du carbone dans l'atmosphère (sous forme de CO₂) par les arbres et est souvent exprimée annuellement en se référant à l'année précédente, le stockage de carbone exprime par ailleurs la quantité totale de carbone qui est stockée et accumulée par les arbres urbains et est donc intimement liée à l'âge des arbres en ville.

¹⁷ Afin de faciliter la comparaison du nombre d'espèces d'arbres entre les différents secteurs étudiés (municipalités et arrondissements), et ce, indépendamment du nombre d'arbres présents, nous avons utilisé la richesse spécifique raréfiée. Cette donnée est standardisée, c'est-à-dire qu'elle représente le nombre d'espèces atteint (par extrapolation) si on s'intéresse à un nombre fixe d'arbres, le même pour tous les secteurs analysés. Ainsi, la richesse spécifique raréfiée ne reflète pas le nombre d'espèces actuellement présentes par municipalité ou arrondissement (ou richesse spécifique), mais permet une comparaison des données malgré l'hétérogénéité des effectifs d'arbres (Chao and Jost, 2012).

Figure 7. Cartes illustrant les différents services écosystémiques produits par les arbres urbains publics au sein de l'île de Montréal, représentés par municipalité de l'agglomération de Montréal et par arrondissement de la Ville de Montréal. Ces services incluent a) l'évitement des eaux de ruissellement, b) la séquestration annuelle de carbone, c) le stockage total de carbone (exprimé par une moyenne annuelle), d) la réduction de la pollution, e) la couverture de la canopée, f) l'évapotranspiration, g) la densité d'arbres, h) la diversité fonctionnelle et i) la richesse spécifique raréfiée.



MONTREAL ET SES ARRONDISSEMENTS

- | | |
|--|--|
| 1. Pierrefonds-Roxboro | 9. Saint-Léonard |
| 2. Saint-Laurent | 10. Le Sud-Ouest |
| 3. Lachine | 11. Le Plateau-Mont-Royal |
| 4. Ahuntsic-Cartierville | 12. Rosemont-La Petite-Patrie |
| 5. Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce | 13. Verdun |
| 6. Montréal-Nord | 14. Ville-Marie |
| 7. LaSalle | 15. Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles |
| 8. Villieray-Saint-Michel-Parc-Extension | 16. Mercier-Hochelaga-Maisonneuve |

LES MUNICIPALITÉS

- A. Baie-D'Urfé
- B. Kirkland
- C. Dollard-Des-Ormeaux
- D. Pointe-Claire
- E. Dorval
- F. Côte-Saint-Luc
- G. Mont-Royal
- H. Hampstead
- I. Westmount
- J. Montréal-Est

Note : Les paramètres a), c), d) et e) ont été standardisés par la taille des municipalités. La carte b) présente une moyenne annuelle du stockage total de carbone. Il s'agit en fait de la carte c). L'âge moyen des arbres urbains est estimé à 50 ans (Dupras et al., 2016b). La carte h) représente l'indice de diversité fonctionnelle qui se situe entre 0 et 1. Plus l'indice est élevé, plus la diversité fonctionnelle est élevée.

Les résultats relatifs à l'ensemble de l'île de Montréal ont été regroupés dans le tableau 1 ci-dessous. En plus des valeurs unitaires obtenues par iTree pour chacun des services écosystémiques analysés, nous avons aussi, lorsque les équations de conversion existent dans la littérature scientifique, présenté une estimation de la valeur monétaire des services écosystémiques produits afin de mieux comprendre la contribution des arbres urbains.

Tableau 1. Résumé des valeurs unitaires et monétaires pour les services écosystémiques produits par les 413 297 arbres urbains publics analysés sur l'île de Montréal.

SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES	Valeur unitaire	Valeur monétaire ^a
Évitement des eaux de ruissellement	344 204,6 m ³ /an	141 123,90 \$/an
Séquestration annuelle de carbone	1 846 586,6 kg/an	290 935,44 \$/an
Stockage total de carbone (moyenne annuelle) ^b	2 381 642,5 kg/an	375 235,17 \$/an
Amélioration de la qualité de l'air	68 432,3 kg/an	3 542 509,38 \$/an
Évapotranspiration	6 431 234,6 m ³ /an	-
Couverture de la canopée ^c	17,8 %	-
Richesse spécifique observée	354	-
CONTRIBUTION MONÉTAIRE ANNUELLE^d		4 349 803,89 \$/an

^a Sources utilisées pour l'estimation des valeurs monétaires : Évitement des eaux de ruissellement (Da Silva et al., 2018); Séquestration et stockage de carbone (Environnement et Changement climatique Canada, 2016); Amélioration de la qualité de l'air (Hirabayashi, 2014).

^b La valeur totale du stockage du carbone a été convertie en valeur annuelle en estimant l'âge moyen des arbres urbains à 50 ans (Dupras et al., 2016b).

^c La valeur totale de la couverture de la canopée se rapporte uniquement aux villes et arrondissements étudiés dans le rapport, et non à toute l'agglomération de Montréal.

^d Total des services écosystémiques sélectionnés pour lesquels il a été possible de calculer un équivalent monétaire

Ainsi, suite à l'analyse d'un total de 413 297 arbres urbains publics géoréférencés sur l'île de Montréal, nous montrons ici une très importante contribution des arbres à l'amélioration de notre qualité de vie, et ce, à de nombreux points de vue. En effet, les arbres permettent **d'éviter le ruissellement** d'environ 344 200 m³ d'eau par année. En d'autres termes, ce sont 344 200 m³ d'eau par année en moins qui sont dirigés vers nos IG (c.-à-d. le réseau d'égout, la station d'épuration, etc.), ce qui représente

un gain de 141 124 \$ en traitement des eaux par année et en réduction de la pression sur le système d'égout, et qui limite par ailleurs les débordements et potentiellement les inondations. En se reportant à la figure 7a, on observe toutefois une forte hétérogénéité dans la production de ce service entre les municipalités et les arrondissements de la Ville de Montréal et seuls trois arrondissements et la ville de Mont-Royal se démarquent positivement sur le territoire. Cela s'explique non seulement par le nombre d'arbres de chaque municipalité ou arrondissement, mais aussi par le fait que tous les arbres, du fait de leurs traits fonctionnels distincts, ne rendent pas les mêmes services à la société. Dans le contexte montréalais, par exemple, les espèces qui réduisent le plus les eaux de ruissellement sont le peuplier deltoïde, l'érable argenté, l'érable de Norvège, le tilleul d'Amérique et le tilleul commun. Toutefois, certaines espèces comme les saules arbustifs (encore peu représentés sur l'île de Montréal) pourraient être des alliés hors pair pour freiner le ruissellement des eaux de pluie du fait de leur très fort potentiel d'évapotranspiration permettant d'assécher les sols et de rediriger l'humidité vers l'atmosphère (Frédette et al., 2018). Souvent par manque de diversité du couvert arboricole (figures 7h et 7i), les villes et les arrondissements bénéficient ainsi de services limités et non diversifiés.

En termes de **réduction du carbone** et d'**amélioration de la qualité de l'air**, les arbres urbains publics fournissent des services équivalant à environ 516 400 dollars par année (séquestration et stockage de carbone) et 3,55 millions de dollars par année (réduction de la pollution dans l'air). Ainsi, naturellement, les arbres publics en ville ont la capacité de réduire significativement la quantité de carbone et de polluants présents dans l'air que nous respirons et de limiter les conséquences graves, voire mortelles, des changements globaux sur notre santé. Une fois encore, certains secteurs de l'île de Montréal bénéficient davantage de ces services, et des efforts de densification et de diversification du couvert arboricole seront nécessaires pour améliorer la situation (figure 7h et 7i).

Enfin, les arbres urbains publics nous rendent d'importants services en termes de **lutte aux îlots de chaleur** et par exemple, on estime à environ 6 431 200 m³ par année (soit l'équivalent d'environ 1 715 piscines olympiques réunies) la quantité d'eau que les arbres libèrent dans l'atmosphère par évapotranspiration sur l'île de Montréal. Chaque goutte d'eau ainsi libérée par les arbres sous forme de vapeur permet de rafraîchir l'air, remplissant alors la fonction de climatiseurs naturels. À noter tout de même qu'à la différence d'une climatisation traditionnelle, le rafraîchissement par les arbres se fait à moindre coût, sans dépense d'énergie, sans rejet de chaleur et sans bruit. En outre, considérant aussi les bénéfices associés à la présence d'une couverture arborée dans nos villes (p. ex., ombrage), les arbres réduisent de façon significative la température dans les zones où l'asphalte et les toits dominant, ce qui

atténué encore davantage les effets négatifs des îlots de chaleur sur notre santé et notre bien-être. Selon une étude menée pour Hydro-Québec, les arbres réduisent significativement l'irradiation solaire captée par les murs de brique des maisons, ce qui peut réduire les besoins de climatisation en été, sans toutefois faire croître les besoins de chauffage en hiver (Claeyssen & Labrecque, 2014). En se reportant aux figures 7e et 7f, on remarque que certains secteurs ont un couvert arboricole très faible et que d'autres bénéficient peu de l'évapotranspiration des arbres pourtant essentielle pendant la saison estivale. Une recommandation majeure pour ces secteurs serait de miser davantage sur les IN dans leurs aménagements en densifiant et en diversifiant le couvert arboricole, mais aussi en participant à des projets de verdissement urbain.

Les résultats relatifs à la **diversité arboricole** nous montrent que de façon générale la diversité est très forte sur l'île de Montréal. Ainsi, pour un total de 413 297 arbres, on comptabilise 354 espèces différentes¹⁸, ce qui est beaucoup plus que les quelque 50 espèces d'arbres indigènes que l'on retrouve au Québec. Cependant, derrière cette forte diversité arboricole se cachent plusieurs aspects négatifs. Premièrement, 40 % des arbres sont composés de seulement trois espèces (l'érable de Norvège [18 %], l'érable argenté [11 %], le frêne vert [11 %]). De plus, plusieurs segments de rues ne comportent qu'une ou deux espèces. En plus de limiter grandement la diversité et la complémentarité des services écosystémiques rendus par ces arbres, ce manque de diversité représente un risque majeur face à de potentiels stress ou perturbations. En effet, puisque la majorité des individus partagent les mêmes caractéristiques biologiques, ils ont la même susceptibilité face à différents facteurs de stress, comme peut l'être un insecte, une maladie ou un événement climatique extrême. À cet égard, nous rappellerons les conséquences dramatiques de la maladie de l'Orme au Québec, ainsi que l'étendue des dommages, qui ne cessent d'augmenter, depuis l'arrivée de l'agrill du frêne. Ces pertes ont par ailleurs des conséquences graves sur la santé des citoyens et la mort de milliers de frênes aux États-Unis a par exemple causé une augmentation significative du nombre de décès suite à des maladies respiratoires ou cardiovasculaires (Donovan et al., 2013). Afin d'assurer une meilleure résilience de nos arbres urbains face à ces risques, et ce, d'autant plus dans le contexte actuel d'accélération des changements globaux, il est désormais crucial de miser sur la diversification des caractéristiques biologiques (ou traits fonctionnels) des arbres. Pour plus de détails sur une application simple de la diversité fonctionnelle, le lecteur pourra consulter le guide de reboisement de Paquette (Paquette, 2016)¹⁹.

¹⁸ Les différents cultivars issus d'une espèce donnée sont considérés comme étant une seule et même espèce puisqu'ils partagent tous les mêmes caractéristiques biologiques. Soixante-dix-huit de ces espèces sont, en effet, des hybrides entre deux espèces différentes.

¹⁹ <http://www.arbresurbains.uqam.ca/fr/guidereboisement/guide.php>

Enfin, la **contribution globale en services écosystémiques** des arbres urbains publics est présentée à la figure 8. Ainsi, cette carte illustre les IN ayant la contribution la plus importante à l'ensemble des services écosystémiques analysés (c.-à-d. les zones où les services sont les plus diversifiés et les plus importants) et par conséquent les zones où les IN jouent un rôle majeur dans l'amélioration de notre santé et de notre qualité de vie. Bien qu'on observe une légère concentration de ces IN au niveau du centre de l'île, elles semblent tout de même réparties de façon relativement uniforme au sein du territoire de l'agglomération (excluant les zones pour lesquelles des données n'étaient pas disponibles), aussi bien en bordure des rivières qu'à l'intérieur des terres.

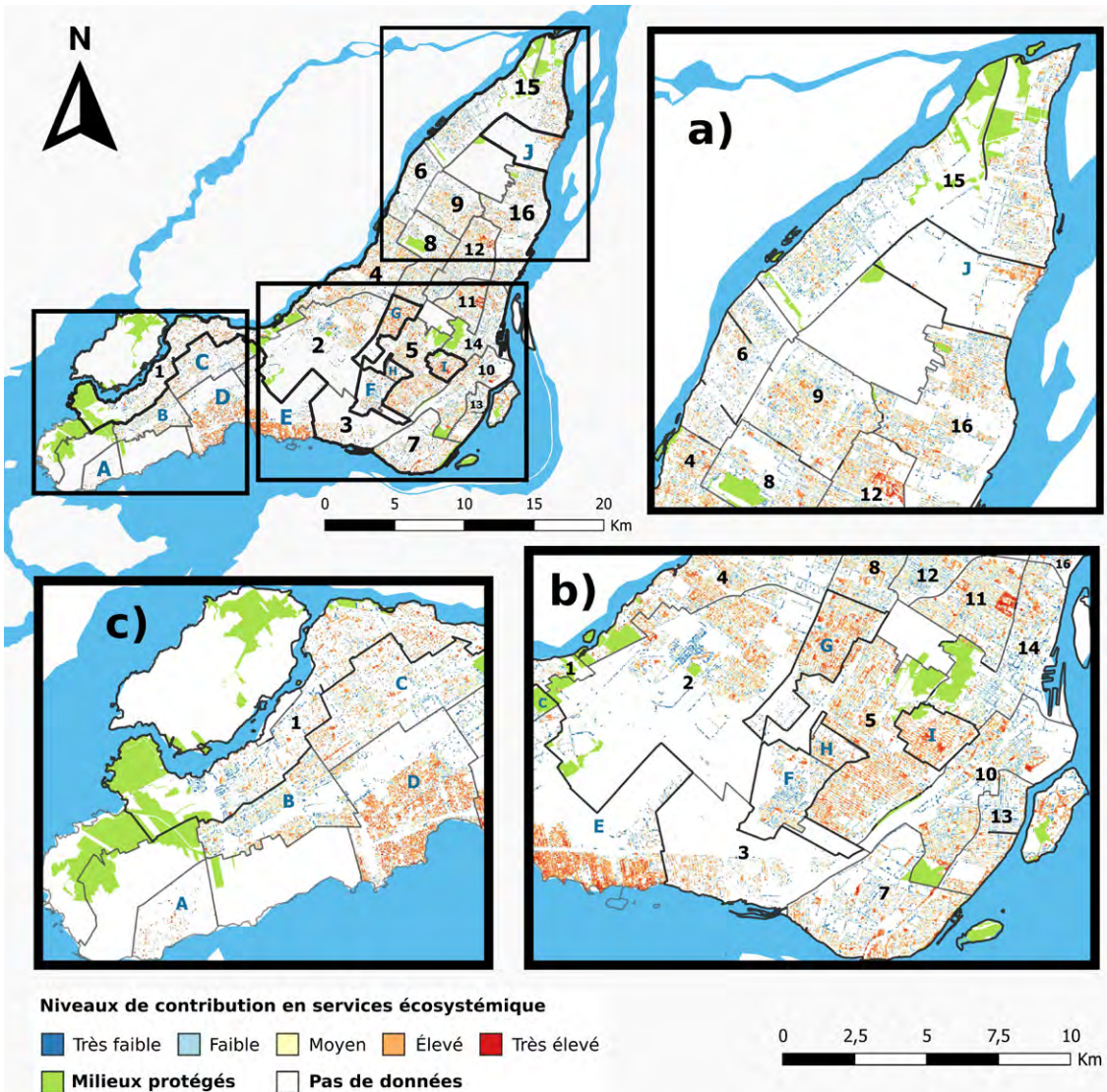
On notera aussi que ces IN jouant un rôle majeur dans le fonctionnement de nos écosystèmes sont aussi localisées aux pourtours des parcs et des espaces verts, et ce, particulièrement autour du Mont-Royal²⁰. Du fait de leur localisation, ces IN viennent probablement compléter et renforcer l'éventail de services écosystémiques fournis par les parcs et les espaces verts²¹ et assurent ainsi une diversité dans le couvert arboricole, mais aussi dans les bénéfices rendus à la communauté. Plus les services rendus par les IN seront diversifiés, plus les milieux seront résilients et résistants face aux changements climatiques et autres stress.

Enfin, on notera aussi que de nombreuses IN isolées ont été identifiées au sein du territoire de par leur grande valeur et leur grande contribution à de nombreux services écosystémiques. De telles IN sont aussi bénéfiques, voire davantage, que les grandes parcelles d'IN, et ce, du fait de leur localisation, de leur maturité et de leur état. L'efficacité des services écosystémiques produits à l'échelle du territoire pourrait toutefois être améliorée en connectant ces IN à un réseau d'IN, de manière à favoriser les échanges, les déplacements et donc la diversité, avantageux aussi bien pour la faune que pour la flore régionale.

²⁰ À noter que les arbres du parc du Mont-Royal ne sont pas inclus dans notre analyse, car les inventaires n'étaient pas disponibles au moment de la rédaction du présent rapport.

²¹ Comme nous l'avons mentionné plus haut, les milieux naturels protégés de l'île de Montréal n'ont pas été inclus dans cette analyse par manque de données au moment de la rédaction du présent rapport.

Figure 8. Carte illustrant la contribution globale des IN en services écosystémiques sur l'île de Montréal. Les services et indices analysés comprennent : l'évitement des eaux de ruissellement, la séquestration annuelle et le stockage total de carbone, la réduction de la pollution, la couverture de la canopée, l'évapotranspiration, le nombre d'arbres, la diversité fonctionnelle et la richesse spécifique.



MONTRÉAL ET SES ARRONDISSEMENTS

- | | |
|---|--|
| 1. Pierrefonds-Roxboro | 9. Saint-Léonard |
| 2. Saint-Laurent | 10. Le Sud-Ouest |
| 3. Lachine | 11. Le Plateau-Mont-Royal |
| 4. Ahuntsic-Cartierville | 12. Rosemont-La Petite-Patrie |
| 5. Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce | 13. Verdun |
| 6. Montréal-Nord | 14. Ville-Marie |
| 7. LaSalle | 15. Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles |
| 8. Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension | 16. Mercier-Hochelaga-Maisonneuve |

LES MUNICIPALITÉS

- A. Baie-D'Urfé
- B. Kirkland
- C. Dollard-Des-Ormeaux
- D. Pointe-Claire
- E. Dorval
- F. Côte-Saint-Luc
- G. Mont-Royal
- H. Hampstead
- I. Westmount
- J. Montréal-Est

RECOMMANDATIONS

Bien que les arbres urbains publics produisent de nombreux services écosystémiques qui profitent aux individus et à la communauté, le contexte actuel est tel que nous devons miser encore davantage sur les bénéfices qu'ils nous fournissent afin d'augmenter la résilience de nos milieux anthropisés. À la lumière des résultats de nos analyses, voici nos principales recommandations :

- Il est important de prioriser une densification, mais également une diversification du couvert arboricole de l'île de Montréal afin de favoriser une meilleure résilience du couvert arboré face aux changements globaux et ainsi assurer la pérennité des nombreux services écosystémiques qui sont rendus par les arbres. Les secteurs les plus industrialisés de l'île de Montréal seraient par exemple particulièrement propices à une augmentation du nombre d'IN étant donné la domination de l'asphalte et la très faible production de services écosystémiques qui y est associée. À noter que la température de surface végétalisée d'un parc est d'environ 20 °C inférieure à la température d'une surface asphaltée (Giguère, 2009).
- Les contours du Mont-Royal devraient aussi faire l'objet d'un programme de reboisement afin de renforcer le réseau d'IN présent dans la partie sud-ouest de la montagne. Par ailleurs, la plantation de nouveaux arbres est d'autant plus importante du côté est et au nord du Mont-Royal puisqu'ils joueraient un rôle important dans l'interception des eaux de pluie et la lutte contre les effets des îlots de chaleur urbains, très présents autour du centre-ville de Montréal. À noter qu'un arbre mature peut libérer jusqu'à 450 L d'eau par jour, ce qui équivaut à cinq climatiseurs fonctionnant 20 h par jour (Giguère, 2009).
- Les secteurs situés au bord de l'eau devraient prioriser l'intégration d'IN dans tous leurs nouveaux aménagements urbains puisque ces secteurs sont particulièrement sensibles aux inondations. Une telle intégration des IN pourrait significativement augmenter l'évitement (par captation) des eaux de ruissellement pour diminuer la pression sur le réseau d'égouts et donc diminuer les risques de surverses et de débordements. Par exemple, l'ajout de bassins de gestion des eaux pluviales ou de rigoles de drainage végétalisées pourrait aider à contenir l'eau suite à de fortes pluies ou à la fonte des neiges, tout en embellissant les rues et en améliorant le

verdissement urbain. De plus, dans le tiers ouest de l'île de Montréal, où le réseau d'égouts (divisé) est conçu de sorte que les eaux de pluie sont dirigées directement vers la rivière des Prairies (au nord) et le fleuve Saint-Laurent (au sud), des aménagements végétalisés, tels que des systèmes de biorétention, sont fortement recommandés. En effet, ces aménagements pourraient contribuer non seulement à ralentir les débits de pointe et les risques d'inondation dans ces secteurs, mais ils pourraient aussi aider à purifier les eaux de pluie qui lessivent des résidus présents sur nos routes, améliorant ainsi la qualité de l'eau en aval. Dans le tiers est de l'île, où le réseau d'égouts (unitaire) dirige les eaux de pluie et les eaux usées directement vers la station d'épuration, les IN peuvent encore une fois aider à ralentir les débits de pointe lors d'événements de précipitations. Une telle diminution réduirait le risque de surverses (contribuant alors à une amélioration de la qualité de l'eau des cours d'eau récepteurs) mais réduirait aussi le volume d'eau acheminé à l'unique station d'épuration des eaux usées de l'île située à Pointe-aux-Trembles²² (entraînant un meilleur traitement des eaux usées). Avec l'augmentation du niveau des précipitations attendues à Montréal en raison des changements climatiques, l'utilisation des IN s'avère une approche non seulement stratégique, mais aussi rentable économiquement pour minimiser les risques d'inondation et améliorer la qualité de l'eau.

- Finalement, des IN aménagées au sein d'un réseau diversifié, durable et connecté au travers du territoire fourniront davantage de bénéfices aux citoyens et répondront donc mieux à leurs besoins. Les secteurs peu végétalisés au centre de l'île devraient donc en ce sens mettre davantage d'efforts dans le reboisement des rues, des ruelles et des aires de stationnement afin d'améliorer la connectivité de l'ensemble du réseau de l'île et donc améliorer les bénéfices fournis par les arbres urbains pour l'ensemble des citoyens.

²² La Station d'épuration des eaux usées Jean-R. Marcotte est la troisième plus grosse au monde, traitant quotidiennement l'équivalent du volume intérieur du Stade olympique. Elle peut ainsi traiter de 2,5 millions de m³ d'eau par jour par temps sec à 7,6 millions de m³ d'eau par temps de pluie. http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6497,54345571&_dad=portal&_schema=PORTAL



Le rôle des milieux naturels dans la prévention des inondations
au sein de la Communauté métropolitaine de Montréal

3. Le rôle des milieux naturels dans la prévention des inondations au sein de la Communauté métropolitaine de Montréal

À la suite d'une analyse spatiale réalisée à petite échelle sur l'île de Montréal et ayant permis de montrer l'apport essentiel d'IN aussi petites que des arbres de rues, nous souhaitons comprendre comment, à plus grande échelle, les milieux naturels contribuent à une amélioration de la qualité de notre environnement. En effet, les milieux naturels et semi-naturels (c.-à-d. les boisés, les boisés linéaires tels que les haies et les bandes riveraines végétalisées bordant les cours d'eau, les friches et les prairies permanentes) peuvent jouer un rôle clé dans l'atténuation des effets liés aux changements climatiques et notamment dans la régulation (par captation) des eaux de ruissellement. À la suite des inondations printanières exceptionnelles vécues par le Québec dans la dernière décennie, il devient crucial de miser sur de tels services fournis naturellement par nos écosystèmes, afin d'augmenter la résilience de nos milieux anthropisés. Cela passe avant tout par la conservation, voire l'expansion, de ces milieux naturels.

Toutefois, peu de données fiables sont disponibles sur les caractéristiques des paysages et il reste difficile de prendre conscience de la part remplie par nos écosystèmes dans ces services écosystémiques pourtant essentiels à notre bien-être (Bissonnette et al., 2018). Ainsi, nous avons réalisé une analyse spatiale des IN²³ présentes sur le territoire de la CMM afin de fournir une évaluation du rôle qu'elles jouent dans la réduction des risques d'inondation, ou d'autres services écosystémiques, mais surtout afin d'identifier les zones à haute priorité de conservation du fait de leur grande contribution.

En nous basant sur une méthodologie d'analyse spatiale déjà développée pour la région (Rayfield et al., 2015), nous avons hiérarchisé les IN du territoire afin de cibler celles dont il est crucial de conserver l'intégrité si on souhaite continuer à bénéficier de la réduction (par captation) des eaux de ruissellement. Cela dit, sachant que les IN ont aussi la capacité de produire simultanément d'autres bénéfices, nous nous sommes intéressés à deux autres services dont bénéficient les citoyens et les communautés, soit la conservation de la biodiversité et la lutte aux îlots de chaleur. L'apport des IN à ces trois services a d'abord été analysé séparément afin d'identifier les milieux naturels qui contribuent le plus à chacun de ces services.

²³ À noter que le manque de données au moment de la rédaction du présent rapport ne nous permet pas l'analyse de la totalité des IN de la CMM. Cette analyse inclut majoritairement des IN boisées, c'est-à-dire les milieux forestiers et les milieux humides boisés, ainsi que certains milieux non boisés (p. ex., milieux humides, prairies) importants pour l'habitat des espèces de vertébrés analysées.

Nous proposons par la suite une stratégie de planification intégrée afin d'identifier les milieux naturels qui devront être conservés si l'on souhaite continuer à profiter pleinement de ces trois services simultanément, priorisant ainsi la conservation des aménagements qui répondent à davantage de besoins.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE ET DES DONNÉES UTILISÉES

Réduction des eaux de ruissellement

Afin d'identifier les milieux naturels ayant un fort potentiel dans la réduction des risques d'inondations, nous avons tout d'abord délimité les zones inondables autour des grands cours d'eau de la CMM. En effet, les milieux naturels terrestres bordant les cours d'eau et les zones inondables, et tout particulièrement les milieux humides, ont le potentiel d'emmagasiner de grandes quantités d'eau et ainsi de réduire les dommages liés à la montée des eaux en aval (Acreman & Holden 2013)²⁴. Par ailleurs, en raison de la faible densité des IN en zones urbaines, ces milieux jouent un rôle d'autant plus important dans la prestation d'autres services écosystémiques tels que la diminution des débits au réseau d'égouts, la réduction des débits d'eaux usées à traiter à l'usine d'épuration, la réduction des événements de surverses, l'épuration des eaux de ruissellement potentiellement contaminées et la réduction des débits d'affluents des grands cours d'eau de la CMM. L'anthropisation de milieux naturels en zones urbaines peut donc être très coûteuse pour la communauté puisqu'elle entraîne la perte des services écosystémiques naturellement fournis.

Bien que la délimitation des zones inondables soit un outil primordial dans la planification et le développement urbain, leur caractérisation à l'échelle du Québec a été réalisée de façon ponctuelle entre 1977 et 2013²⁵. Par conséquent, une partie de ces données ne sont plus à jour et ne prennent pas en compte les changements qui ont eu lieu au niveau du territoire dans les dernières années, voire les dernières décennies (p. ex., modifications naturelles du lit des cours d'eau, constructions de nouvelles infrastructures au sein des milieux hydriques, modifications dans le réseau hydrique). Une mise à jour a pourtant été faite en 2017, mais les données ne sont pas encore disponibles pour le grand public. Ce manque d'actualisation des données a par ailleurs fait l'objet de nombreuses critiques suite aux inondations du printemps 2017 (Rocha 2017; Bernstien & Rocha 2017; Houde-Roy 2018).

²⁴ Les milieux naturels terrestres situés à l'intérieur des terres permettent aussi de réduire les inondations et les événements de surverses, mais ils ne sont pas considérés dans ce critère.

²⁵ <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/base-de-donnees-des-zones-inondables>

Dans le but de pallier le manque de données et l'imprécision des données disponibles, une cartographie basée sur des images satellites des zones inondées aux printemps 2011 et 2017 a été superposée à la cartographie actuelle²⁶ afin d'étendre les limites et d'y inclure les zones récemment touchées par les inondations (figure 9). Un travail de photo-interprétation a été réalisé à la suite de cette délimitation pour valider la classification des zones et ainsi supprimer celles qui, du fait de la similarité de leur réflexion, auraient pu être interprétées à tort comme zones inondées (p. ex., stationnement). En nous basant sur la couche du réseau hydrique qui décrit la superficie des tronçons d'eau lorsqu'ils ont un débit normal²⁷, nous avons pu estimer la superficie des zones terrestres à risque d'inondation (c.-à-d. la zone terrestre comprise entre la limite des zones inondables et celle des cours d'eau à débit normal) et cette estimation est de 109,5 km² (figure 10).

Il est important de souligner que la méthode utilisée pour la délimitation des zones inondables se base sur des photographies ponctuelles et est réalisée uniquement à des fins d'analyses spatiales du territoire de la CMM pour prioriser les zones terrestres ayant un fort potentiel de prévention des inondations. Ces données doivent donc être utilisées avec beaucoup de prudence étant donné l'incertitude qui y est associée. En effet, la production de données sur les zones inondables peut avoir des répercussions économiques et humaines importantes. Ainsi, les données utilisées pour la rédaction du présent rapport ne peuvent en aucun cas être utilisées pour une évaluation foncière, une évaluation des risques ou l'évaluation d'un projet de développement, et ce, en raison de leur incertitude pour ce type d'analyses.

Consciente de ces enjeux et des lacunes actuelles dans les données, la CMM a entamé un travail d'envergure pour produire une cartographie à jour et complète des zones inondables de l'ensemble de son territoire²⁸. La fin de ces travaux est prévue pour la fin de l'année 2020, mais des données préliminaires seront possiblement disponibles dès la fin de l'année 2018. Par ailleurs, les événements de 2017 ayant aussi suscité une réflexion sur la gestion des risques d'inondation à l'échelle de la province dans un contexte de changements climatiques, le MDDELCC met en œuvre le projet Info-Crue²⁹, en collaboration avec Ouranos, pour délimiter les zones inondables pour une grande partie du Québec et prévoir en temps réel l'étendue des inondations. Ce projet s'intègre dans le plan d'action 2018-2023 de la Stratégie québécoise de l'eau 2018-2030³⁰.

²⁶ <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/cartographie-des-inondations-majeures-avril-mai-2017/ressource/0cae6b80-4ebd-4b02-b6f4-b73317eef38e>

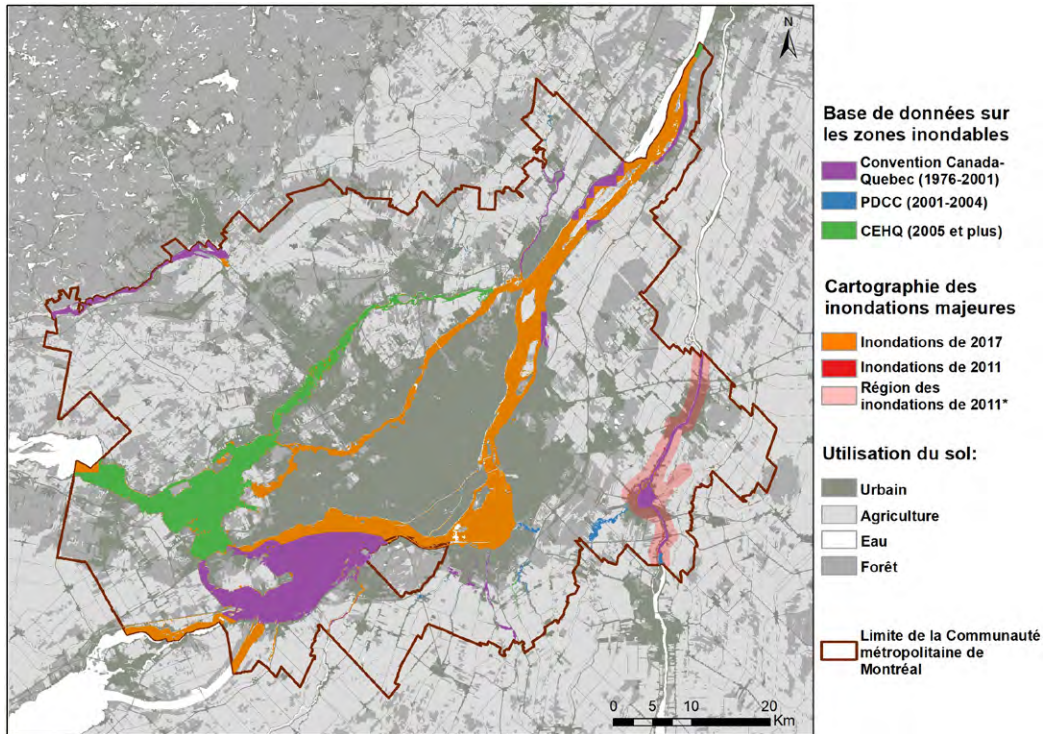
²⁷ <https://open.canada.ca/data/en/dataset/a4b190fe-e090-4e6d-881e-b87956c07977>

²⁸ <http://cmm.qc.ca/champs-intervention/amenagement/dossiers-en-amenagement/inondations/>

²⁹ <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/infuseur/communique.asp?no=4086>

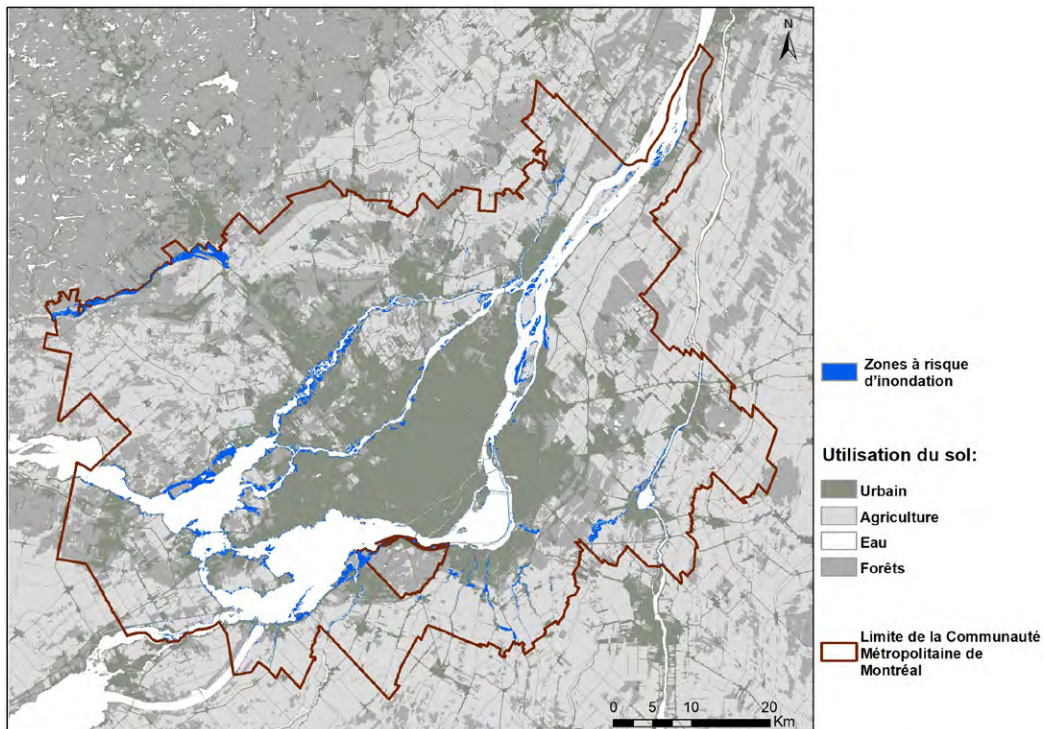
³⁰ <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/strategie-quebecoise/>

Figure 9. Carte illustrant les différentes sources de données utilisées afin de parvenir à délimiter les zones inondables sur le territoire de la CMM.



PDCC : Programme de détermination des cotes de crues; CEHQ : centre d'expertise hydrique du Québec.
 * Localisation de la région touchée par les inondations de 2011 qui ne sont pas visibles à l'échelle de la carte.

Figure 10. Carte des zones à risque d'inondation au sein de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM).



Conservation de la biodiversité

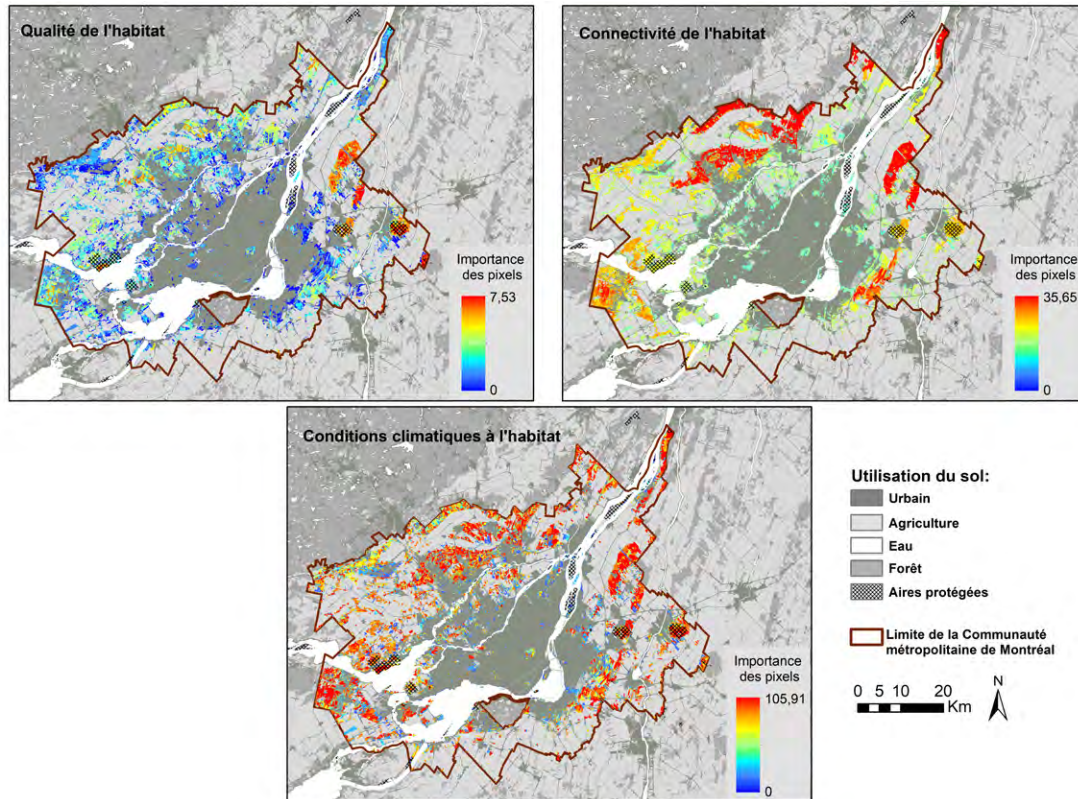
Une stratégie basée sur la conservation de la biodiversité vise prioritairement à maintenir la connectivité courte et longue des forêts afin d'assurer la bonne circulation des espèces sur l'ensemble du territoire (Rayfield et al., 2016). La priorisation des IN en fonction de ce service a été présentée dans une étude mettant en évidence l'efficacité d'un réseau d'IN basé sur la connectivité spatiale (Rayfield et al., 2015). Nous reprendrons ici les grandes lignes de la méthode utilisée afin d'identifier les zones prioritaires, mais le lecteur est invité à consulter l'étude de Rayfield et al. (2015) pour plus de détails.

Les critères sélectionnés pour la conservation de la biodiversité combinent des critères de qualité, de connectivité et de conditions climatiques des habitats pour un échantillon de 14 espèces de vertébrés³¹ représentatives de la biodiversité forestière de la région. Les couches de données associées à ces trois critères ont été tirées de l'étude publiée par Albert et al. (2017), puis adaptées à l'échelle de la CMM. Suivant la même méthode que dans l'étude de 2017, la qualité de l'habitat a été modélisée pour chaque espèce (synthétisée dans la figure 11) en se basant sur une revue approfondie de la littérature (voir Albert et al., 2017) qui considère les traits des espèces et leurs exigences d'habitat en termes de composition du paysage (p. ex., la couverture du sol, les caractéristiques de la forêt) et la configuration du paysage (p. ex., la lisière de la forêt, la distance par rapport aux milieux humides).

La qualité de l'habitat a été cartographiée à une résolution de 30 x 30 m sur la base du 3^e inventaire écoforestier du Québec (MRNF 2009) et a été complétée par des données de la base de données topographiques provinciale (MRNF 2008). Des cartes de résistance relative au mouvement des espèces ont été développées sur l'ensemble des pixels de la cartographie. Les pixels recevant la résistance la plus élevée sont dits de non-habitat et représentent des zones de résistance au mouvement des espèces où leur déplacement est difficile ou menace leur survie, par exemple des routes ou des zones bâties. Les pixels recevant la résistance la plus basse sont les zones dites d'habitat des espèces, soit les zones où leur mouvement est facilité. Les cartes de résistance relative ont formé la base de la modélisation de notre réseau spatial. Pour chacune des 14 espèces, nous avons ainsi pu identifier un réseau qui intègre leurs habitats naturels et les corridors de mouvements potentiels, c'est-à-dire les zones de moindre résistance qui permettent aux espèces de se déplacer d'un habitat à un autre.

³¹ Grande musaraigne (*Blarina brevicauda*), crapaud d'Amérique (*Bufo americanus*), grand pic (*Dryocopus pileatus*), lièvre d'Amérique (*Lepus americanus*), martre d'Amérique (*Martes Americana*), cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*), souris à pattes blanches (*Peromyscus leucopus*), salamandre rayée (*Plethodon cinereus*), grenouille des bois (*Rana sylvatica*), bécasse d'Amérique (*Scolopax minor*), paruline couronnée (*Seiurus auropilla*), sittelle à poitrine rousse (*Sitta canadensis*), chouette rayée (*Strix varia*), ours noir (*Ursus americanus*)

Figure 11. Cartes illustrant les données utilisées dans le processus d'identification de zones prioritaires à la conservation suivant le principe de conservation de la biodiversité. Ces données incluent la qualité de l'habitat, la connectivité de l'habitat et les conditions climatiques favorables aux 14 espèces de vertébrés sélectionnées pour l'analyse.



Note : Chaque carte a été normalisée entre 0 et 1 avant d'être intégrée à Zonation. Chaque carte est la somme de toutes les cartes relatives aux critères basés sur la biodiversité. De façon plus détaillée, la carte de la qualité de l'habitat est la somme de 14 cartes réalisées pour chacune des 14 espèces de vertébrés, la carte de connectivité de l'habitat synthétise 70 cartes (14 espèces x 5 mesures de connectivité), et celle représentant les conditions climatiques synthétise 126 cartes climatiques (14 espèces x 4 scénarios climatiques x).

La connectivité a été évaluée pour l'année 2000³² selon l'analyse de la qualité des habitats et des diverses mesures de la connectivité courte et longue (Rayfield et al., 2016) (synthétisée dans la figure 11). Nous avons modélisé les conditions climatiques propices à chacune des espèces analysées à une résolution de 10 x 10 km (Albert et al., 2017). Tout d'abord, les conditions climatiques ont été modélisées sur la période de 1971 à 2000 dans l'Est de l'Amérique en fonction de la température annuelle moyenne et des précipitations annuelles moyennes. Ensuite, le modèle

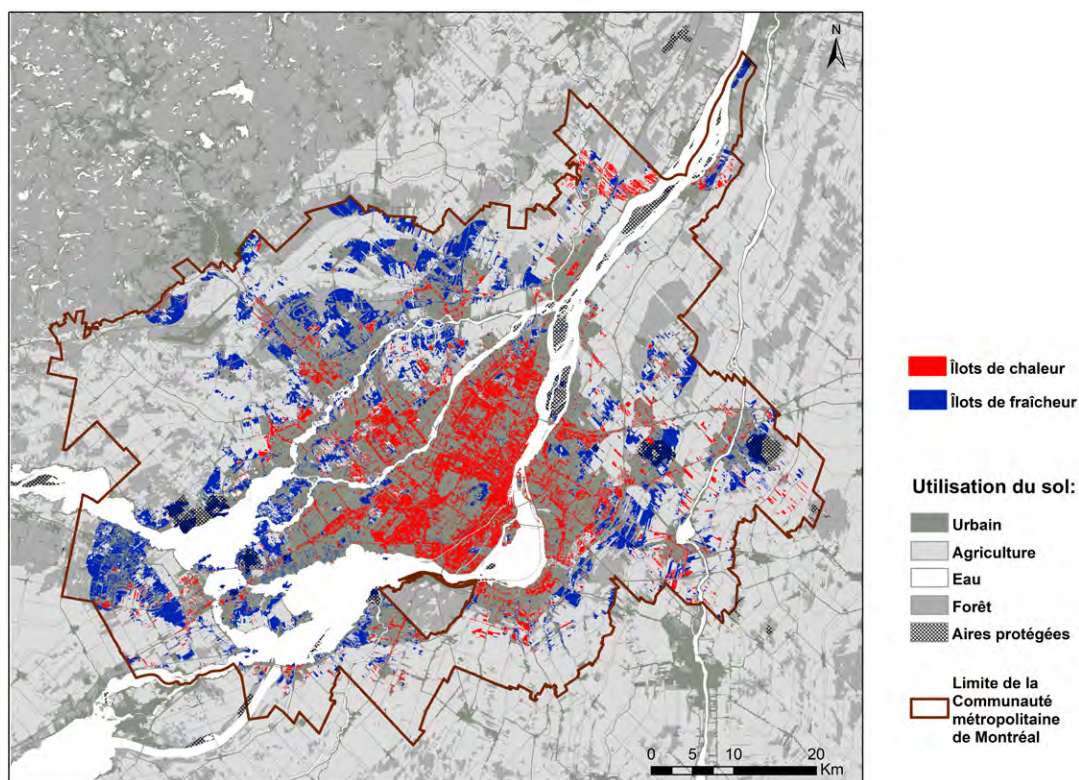
³² L'année 2000 représente l'année la plus récente pour laquelle l'ensemble des données nécessaires aux analyses était disponible. Ainsi, cette analyse n'inclut pas les changements du territoire des deux dernières décennies en ce qui a trait à la conservation de la biodiversité.

a été utilisé pour prédire l'avenir des conditions climatiques propices à la vie des espèces dans les années 2015 et 2050 dans quatre scénarios représentatifs des changements climatiques (Meehl et al., 2007; Nakicenovic and Swart, 2000). Nous avons également produit un scénario d'absence de changements climatiques. Tous les scénarios climatiques associés à chacune des espèces sont synthétisés dans la figure 11 ci-dessus.

Réduction des effets liés aux îlots de chaleur urbains

Suivant la même méthode que l'étude de Rayfield et al. (2015), l'identification des îlots de chaleur au sein du territoire de la CMM a été réalisée à partir de données produites par le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy Inc (CERFO, 2013). Ce centre a développé un modèle de prédiction de la température de surface pour localiser les îlots de chaleur et de fraîcheur dans les zones urbaines du Québec (c.-à-d. population supérieure à 400 hab/km²). Sur la base de l'imperméabilité de la surface au rayonnement solaire, les chercheurs ont identifié neuf niveaux de température de surface. Pour notre analyse, nous avons utilisé les niveaux 1, 2, 3 et 4 combinés pour former les îlots de fraîcheur et les niveaux 8 et 9 combinés pour les îlots de chaleur (figure 12).

Figure 12. Cartes illustrant la localisation des îlots de chaleur et des îlots de fraîcheur au sein du territoire de la CMM.



IDENTIFICATION DES ZONES PRIORITAIRES À LA CONSERVATION SPATIALE SELON CHAQUE SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE (OBJECTIF UNIQUE)

Nous comparons ici les IN de la CMM afin d'identifier celles dont la contribution est la plus importante suivant l'analyse individuelle pour chacun des trois services écosystémiques sélectionnés, soit la réduction des eaux de ruissellement, la conservation de la biodiversité et la lutte aux îlots de chaleur. L'analyse de l'identification des zones prioritaires à la conservation a été réalisée par hiérarchisation des IN du territoire en se basant sur leurs caractéristiques et selon le service analysé. Le territoire a d'abord été divisé en un ensemble fin de pixels où chaque pixel a reçu un pointage différent pour chacune des couches de données analysées, relativement à la nature du milieu et à sa localisation (p. ex., un pixel localisé en bordure d'un cours d'eau et jouant un rôle important dans l'évitement des eaux de ruissellement a reçu un pointage important pour ce service). Ensuite, les différentes couches de données ont été additionnées pour chacun des services analysés afin de hiérarchiser les pixels au sein de l'ensemble du territoire et d'identifier les zones ayant reçu le pointage total le plus élevé par service écosystémique. Les zones où l'importance des pixels était la plus élevée ont ainsi été identifiées prioritaires à la conservation pour chacun des services écosystémiques analysés.

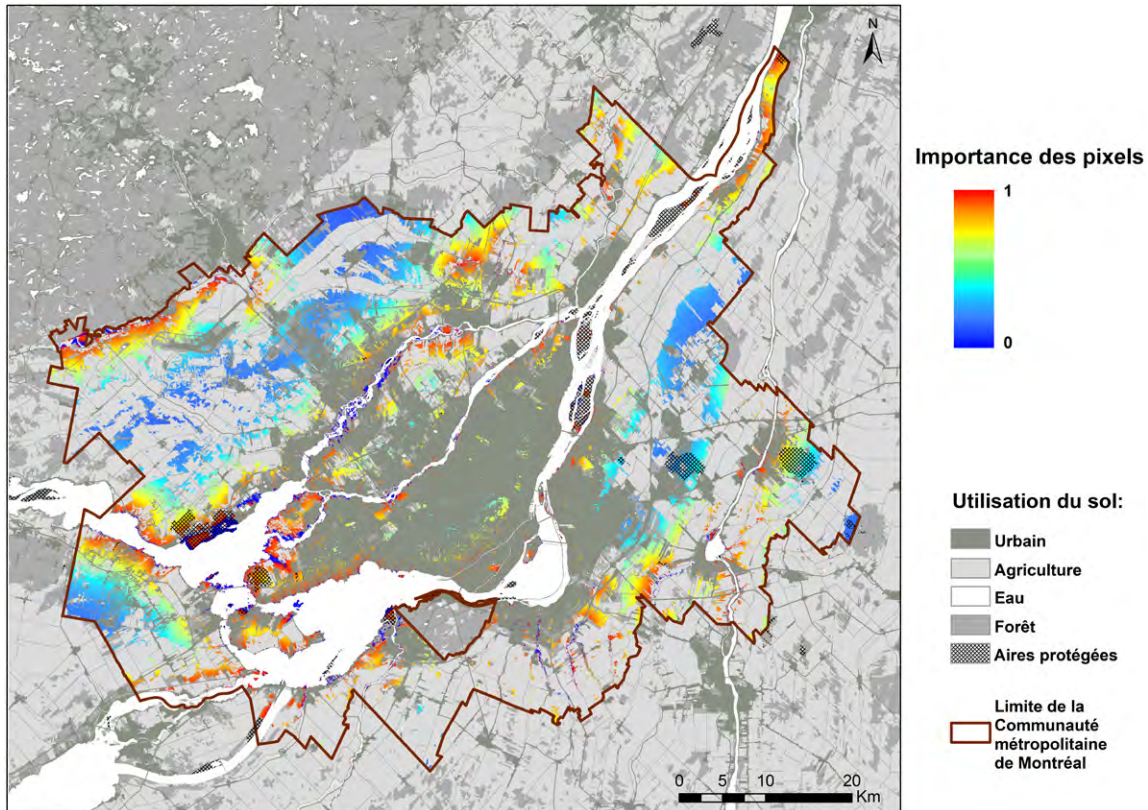
Réduction des eaux de ruissellement

À partir de la délimitation des zones inondables et de la répartition des forêts dans la CMM, nous avons développé un critère afin d'estimer les effets des IN sur la prévention des inondations. Ce critère a été dérivé à partir de la délimitation des zones inondables et de la carte de la couverture forestière du Grand Montréal (2011)³³ (couche convertie en une image raster de résolution 30 x 30 m). Nous avons calculé l'inverse de la distance entre chaque pixel de forêt et la zone inondable la plus proche et utilisé cette carte inverse de la distance comme critère pour les effets de prévention des inondations. Les pixels de forêt à proximité des zones inondables sont tous priorisés avec le même poids en fonction de ce critère.

La carte de hiérarchisation de conservation des IN pour favoriser la réduction des inondations et des événements de surverses dans la CMM est présentée à la figure 13. Les zones à haute priorité de conservation sont ainsi localisées le long des grands cours d'eau et des lacs, à faible distance des zones inondables. La majorité de ces zones sont réparties sur la rive nord et la rive sud de la CMM, mais on note aussi l'identification d'IN sur l'île de Laval et sur la partie ouest de l'île de Montréal.

³³ <http://cmm.qc.ca/donnees-et-territoire/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/donnees-georeferences/>

Figure 13. Carte de hiérarchisation des IN selon leur contribution dans la prévention des inondations sur le territoire de la CMM. Sur cette carte, le territoire a été divisé en un ensemble fin de pixels et ces pixels sont ensuite classés selon leur importance (pointage total des pixels) dans le réseau d'IN en termes de réduction des eaux de ruissellement.

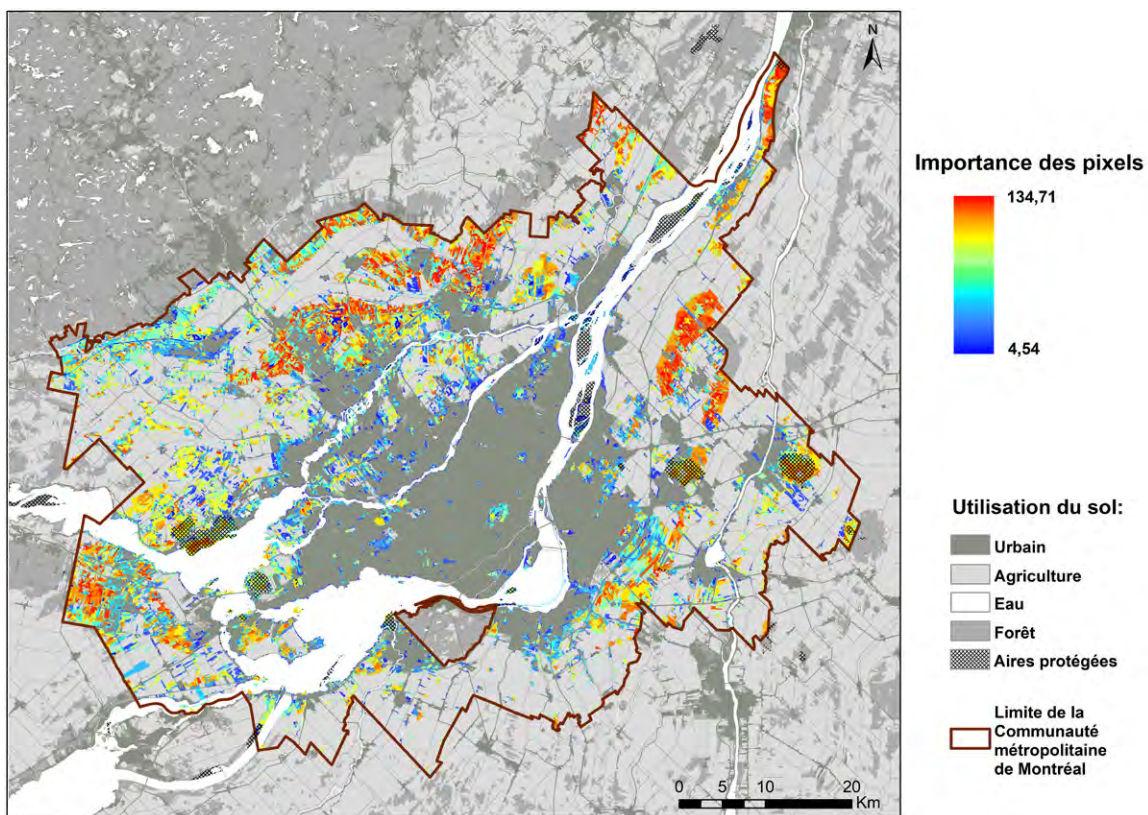


Conservation de la biodiversité

Nous avons utilisé l'ensemble des couches relatives à la biodiversité (c.-à-d. qualité, connectivité et conditions climatiques des habitats pour les 14 espèces de vertébrés) comme base pour l'analyse d'identification des zones prioritaires à la conservation. Nous avons ainsi superposé les données relatives aux conditions d'habitats et aux mouvements propres à chacune des espèces pour identifier les IN permettant de former un réseau de connectivité écologique multi-espèces. Les paramètres relatifs à l'analyse de la connectivité (c.-à-d. habitat naturel, mouvement potentiel, résistance au déplacement) et aux conditions climatiques ont reçu le même poids total dans l'analyse.

La carte de hiérarchisation de conservation des IN pour favoriser la conservation de la biodiversité dans la CMM est présentée à la figure 14 ci-dessous. On y observe que les hautes priorités de conservation se situent au sein des grands massifs forestiers des rives nord et sud, mais les parcelles de forêts localisées en milieux très urbanisés, comme sur les îles de Montréal et Laval semblent aussi jouer un rôle important dans la connectivité régionale.

Figure 14. Carte de hiérarchisation des IN selon leur contribution dans la conservation de la biodiversité sur le territoire de la CMM. Sur cette carte, le territoire a été divisé en un ensemble fin de pixels et ces pixels sont ensuite classés selon leur importance (pointage total des pixels) dans le réseau d'IN en termes de conservation de la biodiversité.



Réduction des effets liés aux îlots de chaleur urbains

En nous basant sur la carte des températures de surface et la répartition des forêts dans la CMM, nous avons ainsi pu développer un critère pour estimer les effets des IN sur la réduction des îlots de chaleur (le lecteur pourra se reporter à l'étude de Rayfield et al. [2015] pour plus de détails sur la méthode). Ce critère a été dérivé à partir des données sur les îlots de chaleur et du couvert forestier du Grand Montréal³⁴ (couche

³⁴ <http://cmm.qc.ca/donnees-et-territoire/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/donnees-georeferencées/>

convertie en une image raster de résolution 30 x 30 m). Sur le même principe et suivant la même méthode que pour les données relatives aux zones inondables, nous avons ainsi calculé l'inverse de la distance entre chaque pixel de forêt et l'îlot de chaleur le plus proche et utilisé cette carte inverse de la distance comme critère pour les effets de réduction des îlots de chaleur. Les pixels de forêt à proximité des îlots de chaleur sont tous priorisés avec le même poids en fonction de ce critère.

La carte de hiérarchisation des IN pour favoriser la conservation de la biodiversité dans la CMM est présentée à la figure 15 ci-dessous. Les zones à haute priorité de conservation sont ainsi localisées autour des îlots de chaleur urbains, et ce, aussi bien sur la rive nord que la rive sud de Montréal. Les zones boisées sur les îles de Laval et de Montréal sont aussi identifiées à haute priorité de conservation étant donné la concentration d'îlots de chaleur dans ces secteurs (figure 12).

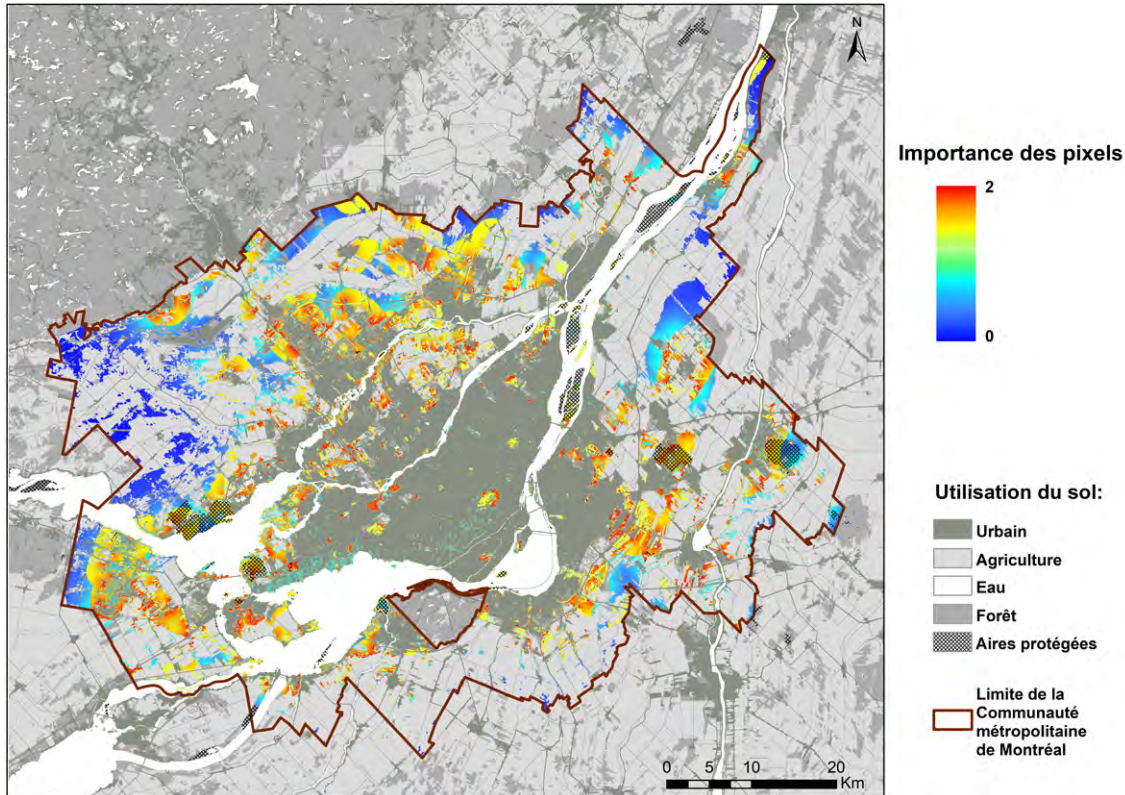
Ainsi, puisque les milieux naturels ne remplissent pas les mêmes services écosystémiques, les résultats de ces analyses nous montrent que les IN identifiées à haute priorité de conservation sont très différentes selon le service écosystémique privilégié. Or, face aux contraintes économiques, réglementaires et politiques, les décideurs se retrouveront face à des choix difficiles quant aux milieux qui devraient alors être conservés en priorité. Pourquoi faudrait-il choisir entre la diminution des risques pour les citoyens, leur santé et la conservation de la biodiversité? Pourquoi faudrait-il miser sur une planification optimisant seulement un service écosystémique alors que les aménagements d'IN multifonctionnels peuvent fournir des solutions équilibrées et durables, qui répondent simultanément à différentes exigences? Dans la section suivante, nous proposons une stratégie de planification à objectifs multiples, permettant de maintenir des bénéfices aussi bien dans la prévention des inondations que dans la conservation de la biodiversité et la lutte aux îlots de chaleur.

IDENTIFICATION DES ZONES PRIORITAIRES À LA CONSERVATION POUR L'ENSEMBLE DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES (OBJECTIFS MULTIPLES)

La stratégie proposée ici vise à hiérarchiser les IN de la CMM de façon à identifier celles qui jouent un rôle à la fois dans la réduction des eaux de ruissellement, dans la conservation de la biodiversité et dans la lutte aux îlots de chaleur. Étant donné les multiples bénéfices qu'elles nous procurent, et le contexte dans lequel nous évoluons, il devient important de s'assurer du maintien durable (soit la protection) de ces IN dans notre environnement, et ce, malgré les projets d'étalement urbain.

Actuellement, l'une des trois orientations du Plan métropolitain d'aménagement et de développement (PMAD) de la CMM est de conserver 17 % de son territoire. Ce niveau de protection correspond à l'un des objectifs de la Convention des Nations Unies sur la biodiversité biologique que tous les pays signataires se sont engagés à respecter d'ici 2020.

Figure 15. Cartes de hiérarchisation des IN selon leur contribution dans la réduction des îlots de chaleur urbains. Sur cette carte, le territoire a été divisé en un ensemble fin de pixels et ces pixels sont ensuite classés selon leur importance (pointage total des pixels) dans le réseau d'IN en termes de réduction des îlots de chaleur urbains.



Dans le cadre de cette étude, les IN incluses dans nos analyses représentent environ 25 % du territoire de la CMM³⁵. Ainsi, une planification visant 17 % de protection d'IN correspond à une protection d'approximativement 70 % des IN du territoire. En d'autres termes, cela assurerait le maintien de façon durable des services écosystémiques produits par 70 % des IN, le reste du territoire pouvant potentiellement disparaître. En se basant sur cet objectif, et pour mieux comprendre les enjeux actuels, nous avons comparé les zones identifiées comme prioritaires avec celles issues de niveaux inférieurs de protection : 10 % d'aires protégées (correspondant à un maintien durable d'environ 40 % des IN du territoire) et 5 % d'aires protégées (correspondant à un maintien durable d'environ 20 % des IN du territoire)³⁶.

³⁵ Nous rappelons toutefois qu'en raison du manque de données au moment de la rédaction du présent rapport, cette analyse n'inclut pas la totalité des IN présentes sur le territoire de la CMM. D'autres analyses seront donc à prévoir lorsque l'ensemble des milieux naturels de la CMM auront été caractérisés.

³⁶ À partir des données mises à jour en 2000, la superficie des aires protégées au sein du territoire de la CMM avait été estimée à 1,87 %.

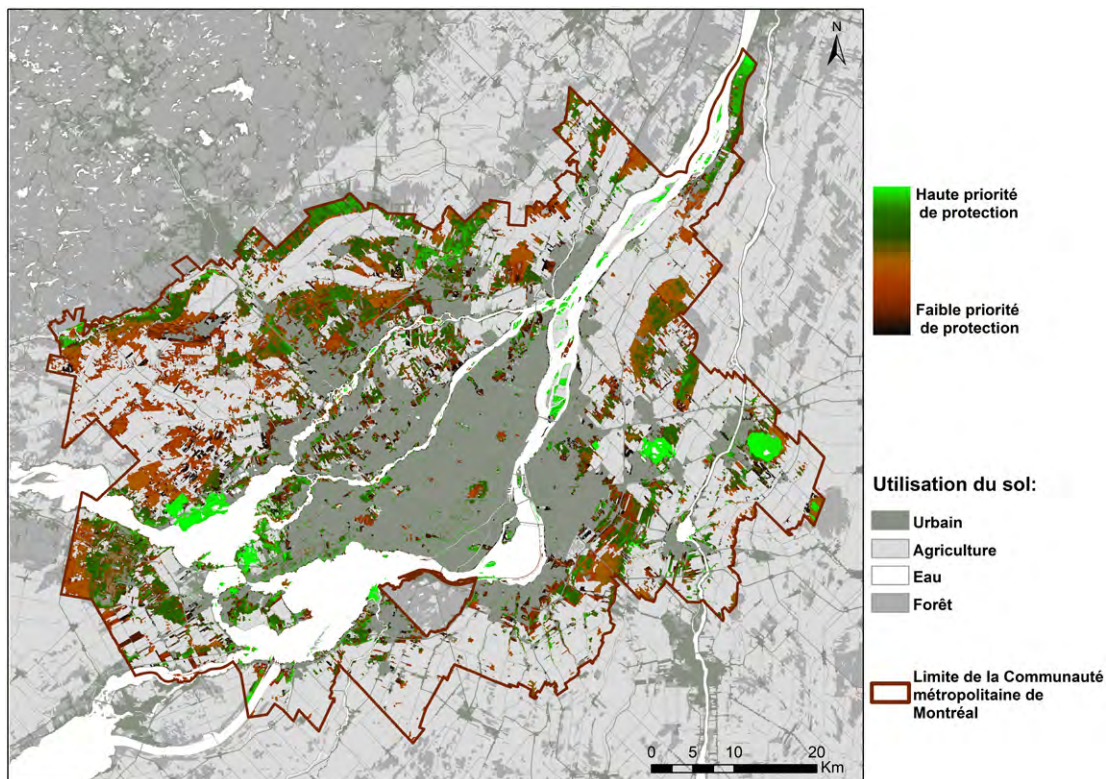
L'analyse des priorités de conservation est réalisée à l'aide du logiciel Zonation³⁷. Il s'agit d'un logiciel d'aide à la décision qui a été largement utilisé pour identifier les priorités de conservations spatiales à l'aide de la distribution de plusieurs caractéristiques de conservation telles que les espèces, les habitats et les services écosystémiques (Moilanen, 2007, 2008; Moilanen et al., 2011). En divisant le territoire en un ensemble fin de pixels aux caractéristiques variées (p. ex., type de couverture du sol, qualité de l'habitat), le logiciel produit une carte de priorité de rang pour chaque pixel et un ensemble de courbes de performance, soit leur importance dans le réseau (voir Rayfield et al., 2015; Rayfield et al., 2016; Albert et al., 2017 pour plus de détails sur la méthode). En d'autres termes, ce logiciel nous permet de classer les IN du territoire selon l'importance de leur contribution pour l'ensemble des services écosystémiques analysés. Nous avons ainsi utilisé la couche relative aux zones inondables, l'ensemble des couches relatives à la biodiversité (c.-à-d. qualité, connectivité et conditions climatiques des habitats pour les 14 espèces de vertébrés) ainsi que l'ensemble des couches relatives aux îlots de chaleur (c.-à-d. îlots de fraîcheur et boisés proches des îlots de chaleur) comme base pour l'analyse des priorités de conservation. La superposition de tous ces critères nous a permis de générer un réseau de connectivité écologique multi-espèces, dans lequel on priorise aussi bien les IN favorisant la prévention des inondations que les IN réduisant les effets liés aux îlots de chaleur. Tous les services analysés ont reçu le même poids total dans le logiciel Zonation.

La figure 16 ci-dessous illustre les résultats de l'analyse de priorisation spatiale favorisant l'efficacité simultanée des trois services écosystémiques sélectionnés. Les zones de priorité identifiées comprennent à la fois des zones en bordure des grands cours d'eau et des lacs pour participer à la réduction des eaux de ruissellement (c.-à-d. le long de la rivière des Mille-Îles ainsi qu'autour du lac des Deux Montagnes pour la rive nord et le long du fleuve Saint-Laurent et autour du lac Saint-Louis pour la rive sud), de grandes parcelles au sein des massifs forestiers des rives nord et sud pour faciliter la connectivité des espèces, ainsi que des petites parcelles en zones urbaines contribuant à la réduction des effets liés aux îlots de chaleur.

Une telle planification vise donc à optimiser l'aménagement des IN du réseau de façon à répondre à de multiples critères d'adaptation aux changements climatiques. Il est toutefois important de souligner que la gestion des ressources en eau et du milieu naturel dans une optique de prévention d'évènements majeurs (p. ex., inondations des printemps 2011 et 2017) doit se faire de manière intégrée sur l'ensemble du territoire hydrologique, et ne se limite donc pas au territoire de la CMM. Ainsi, pour reprendre l'exemple du printemps 2017, l'optimisation de telles mesures de prévention inclurait l'analyse des flux hydrologiques du bassin versant de la rivière

³⁷ <https://www.helsinki.fi/en/researchgroups/statistical-ecology/software#section-14300>

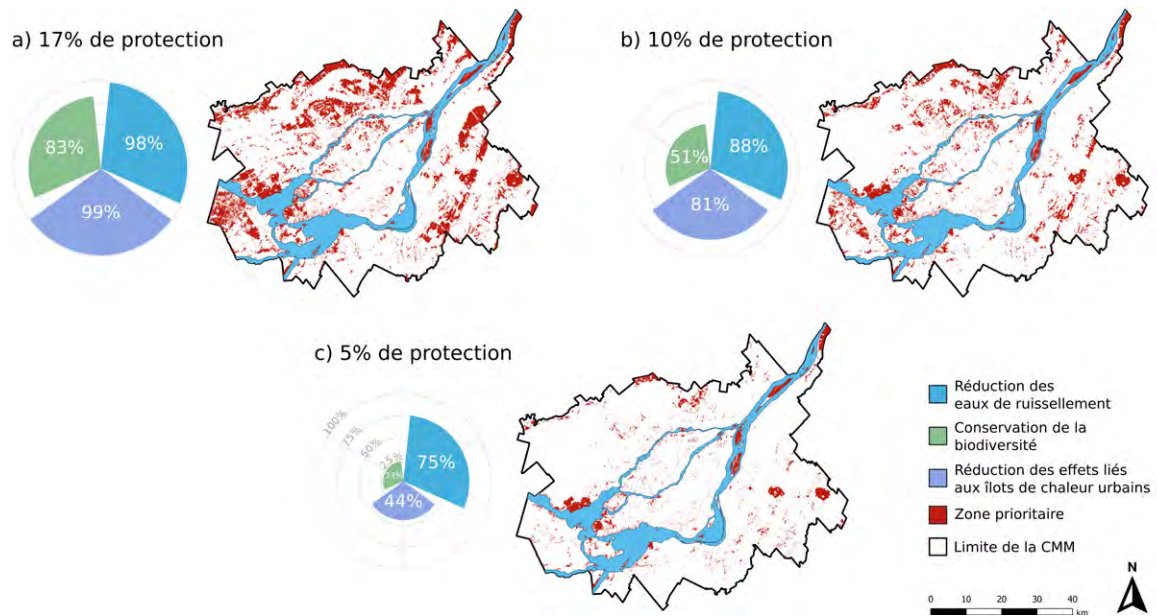
Figure 16. Carte de priorisation de conservation suivant une stratégie favorisant à la fois la réduction des risques d'inondation, la conservation de la biodiversité et la lutte aux îlots de chaleur. Sur cette carte, le territoire a été divisé en un ensemble fin de pixels et ces pixels sont ensuite priorisés selon leur importance dans le réseau d'IN à la fois en termes de réduction des eaux de ruissellement, de conservation de la biodiversité et de la réduction des îlots de chaleur urbains.



des Outaouais ainsi que la gestion des milieux naturels au sein de l'ensemble du territoire. À noter que les événements de surverses sont toutefois dépendants de conditions plus locales, par exemple du type de réseau d'égouts présents sur le territoire, et leur fréquence pourrait être significativement réduite par une gestion des milieux naturels de la CMM favorisant l'emmagasinement de surface.

La figure 17 ci-dessous illustre les différences spatiales de conservation obtenues entre les trois niveaux de protection décrits précédemment, soit 17 %, 10 % et 5 % du territoire de la CMM. Ainsi, si l'on prend l'exemple de la conservation de seulement 5 % du territoire (figure 17c), les zones identifiées correspondent aux 5 % des zones ayant reçu la plus haute priorité de conservation dans la figure 16. Par ailleurs, afin de mieux comprendre les conséquences associées à la perte potentielle des IN du

Figure 17. Comparaison de la contribution des milieux naturels en services écosystémiques (diagrammes en pétale) selon trois niveaux de protection du territoire de la CMM (cartes) : a) 17 % de protection, b) 10 % de protection et c) 5 % de protection.



Note : Dans les diagrammes en pétale, chaque service est évalué sur un total de 100 %, qui correspond au maximum de ce que les IN actuellement considérées dans l'analyse pourraient fournir. Ainsi, lorsque 100 % des critères sont retenus, cela signifie que la conservation du territoire permet aux IN de générer un service à 100 % de leur capacité.

territoire (dans le cas où elles ne bénéficient d'aucune protection), cette figure illustre aussi la contribution en services écosystémiques des milieux naturels analysés pour chacun des niveaux de protection. À noter que pour chacun de ces scénarios, cette contribution n'a été évaluée que pour les milieux naturels inclus dans la stratégie de conservation, soit 17 %, 10 % et 5 % du territoire de la CMM.

Tout d'abord, on y observe que plus la superficie de protection diminue, plus la superficie des zones priorisées (en rouge dans la figure) dans la conservation est petite. Ainsi, la distribution des zones ne diffère pas beaucoup d'un niveau de protection à l'autre, mais la taille des parcelles protégées réduit proportionnellement à la diminution de la superficie du territoire protégée.

Au-delà de comparer les différences spatiales de priorités de conservation entre ces niveaux de protection, il est notamment intéressant de comparer les conséquences, en termes de contribution en services écosystémiques, associées à la perte potentielle des IN du territoire (diagrammes en pétale de la figure 17). Dans

ces diagrammes, chaque service est évalué sur un total de 100 %, qui correspond au maximum de ce que les IN actuellement considérées dans l'analyse pourraient fournir. Ainsi, lorsque 100 % des critères sont retenus, cela signifie que la conservation du territoire permet aux IN de générer un service à 100 % de leur capacité. On remarque que la protection de 17 % du territoire ciblée par la CMM, soit la protection d'environ 70 % des IN du territoire, ne suffit pas à maintenir l'intégrité des milieux naturels boisés présents pour les services écosystémiques considérés dans cette analyse. En effet, bien que cette protection semble assurer la production de services en réduction des eaux de ruissellement et en réduction des effets liés aux îlots de chaleur, les services rendus en termes de conservation de la biodiversité³⁸ n'atteignent pas leur pleine capacité de contribution. Ainsi, il faudrait protéger plus de 17 % du territoire afin d'optimiser les services écosystémiques rendus par les IN considérées dans cette analyse.

Si l'on s'intéresse maintenant aux niveaux inférieurs de protection du territoire (figure 17b et c), on observe que la quantité de critères retenus pour chacun des services diminue proportionnellement à la diminution de la surface du territoire qui est protégée. Ainsi, lorsque seulement 5 % du territoire sont protégé (figure 17c), la production en services écosystémiques atteint désormais 75 % de son efficacité pour la réduction des eaux de ruissellement, 44 % pour la lutte aux îlots de chaleur et 26 % pour la conservation de la biodiversité. L'apport des IN en services écosystémiques diminue donc entre 25 et 65 % lorsque la superficie de protection du territoire passe de 17 % à 5 % du territoire, la perte la plus importante étant pour la conservation de la biodiversité.

³⁸ Analyse basée sur un échantillon de 14 espèces de vertébrés représentatives de la biodiversité forestière de la région.

RECOMMANDATIONS

Les IN qui nous entourent jouent un rôle majeur dans la production de services écosystémiques. Ces services sont multiples et variés, mais ils sont tous essentiels à notre bien-être et à notre santé. Nous devons désormais miser sur une protection plus durable de ces IN mais aussi sur leur expansion au sein du territoire afin d'assurer leur intégrité et donc la durabilité des bénéfices qu'ils nous rendent. Par ailleurs, les réseaux d'IN ont la capacité de produire de multiples services essentiels au bon fonctionnement de la société et sont en ce sens plus efficaces et moins coûteux que n'importe quelle infrastructure grise. À la lumière des résultats de nos analyses, voici nos principales recommandations :

- Les IN présentes sur le territoire de la CMM contribuent présentement à notre bien-être et à notre qualité de vie. Dans l'éventualité du maintien durable de seulement 20 % des IN du territoire (soit la stratégie ciblant 5 % de protection de la CMM), les pertes en services écosystémiques seraient immédiates et dramatiques pour les citoyens : 25 % de contribution des IN en moins dans la réduction des eaux de ruissellement, 55 % en moins dans de la lutte aux îlots de chaleur et 65 % en moins dans la conservation de la biodiversité (pour ne citer que ces services). De telles pertes doivent absolument être évitées pour le bien-être de la société.
- Une protection minimale de 17 % du territoire la CMM devrait être atteinte à très court terme non seulement dans le but de remplir les engagements qui ont été pris, mais surtout afin de ne pas risquer de perdre les milieux naturels qui contribuent grandement à la qualité de notre environnement. Toutefois, bien que ce processus de priorisation de conservation des IN permette de maintenir les IN dont nous dépendons le plus, cette approche ne permet en aucun cas de compenser pour de nouvelles pertes de milieux naturels. Tous les milieux naturels jouent un rôle dans nos écosystèmes et nous devons donc limiter leur perte. Des seuils plus élevés de protection devront donc être ciblés à long terme afin de garantir leur pérennité.
- Afin de favoriser l'absorption des eaux de ruissellement, des efforts particuliers devraient être mis dans la revégétalisation des berges des cours d'eau et dans la renaturalisation des milieux humides du territoire.
- Nous devons désormais miser sur une approche coordonnée, basée sur la connectivité des IN sur l'ensemble du territoire de la CMM, afin de créer un écosystème plus résilient face aux changements climatiques et qui aura la capacité de fournir une large gamme de services écosystémiques.



Conclusion

4. Conclusion

Dans le contexte actuel d'une accélération des changements globaux et particulièrement des changements climatiques, il est primordial de repenser la planification de nos aménagements et de privilégier des stratégies qui visent une optimisation de la résilience de nos infrastructures face aux stress et aux perturbations à venir. Parmi ces perturbations liées au climat, on prévoit pour le sud du Québec une forte augmentation du niveau des précipitations, ce qui peut représenter des risques majeurs pour la santé et le bien-être des citoyens. En effet, les systèmes de gestion des eaux de ruissellement ayant déjà atteint leur limite sur le territoire de la CMM au cours des dernières années, de nouveaux débordements et refoulements d'égouts sont à prévoir, ce qui donnera lieu à une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des inondations. De plus, lorsque de grandes quantités d'eau sont dirigées vers la station d'épuration (plutôt que retenues dans les sols par les végétaux) le traitement des eaux et leur décontamination sont réalisés de façon accélérée, ce qui affecte la qualité de l'eau à l'exutoire. En modifiant nos approches d'aménagement du territoire et en privilégiant davantage des actions coordonnées, basées sur l'apport et la connectivité des IN, nous sommes en mesure de favoriser un environnement urbain plus résilient face aux changements climatiques, capable de fournir un large spectre de services écosystémiques.

L'efficacité des réseaux d'IN n'est désormais plus à prouver et de nombreuses villes à travers le monde ont misé sur de telles approches pour répondre aux besoins de leur population (voir entre autres les exemples de Berlin, Barcelone et New York dans Rayfield et al. 2015). Ces réseaux d'IN peuvent fournir des solutions efficaces, équilibrées et durables qui répondent simultanément à plusieurs objectifs. Ainsi, nous démontrons dans cette étude l'efficacité d'une stratégie de planification territoriale axée à la fois sur la réduction des risques d'inondation, la réduction des effets liés aux îlots de chaleur et la conservation de la biodiversité. En intégrant des critères misant sur l'organisation spatiale du territoire, la connectivité des milieux naturels et le fonctionnement des écosystèmes dans la gestion des aménagements, il est possible d'optimiser l'efficacité des services écosystémiques produits sur le territoire de la CMM. Cette approche a par ailleurs l'avantage d'être très flexible et peut donc être appliquée avec de nombreux autres objectifs socio-économiques et aussi être utilisée afin de permettre l'expansion et la densification des IN au sein du territoire. À une échelle plus petite, notre étude montre que des efforts sont à prévoir dans l'augmentation du nombre d'IN en milieux urbains afin de réduire les effets négatifs des changements globaux. Par exemple, certains secteurs de l'île de Montréal, notamment les secteurs où l'asphalte et les toits dominent, doivent dorénavant miser sur le reboisement des rues, des ruelles et des aires de stationnement afin de profiter de services naturellement fournis par les arbres pour améliorer la qualité de vie dans ces secteurs.

Le contexte est tel que des actions concrètes et globales sont désormais requises afin d'assurer la protection et la conservation de ces milieux qui jouent un rôle clé au sein des réseaux d'IN de la CMM. L'approvisionnement en services écosystémiques dont nous dépendons tant pour notre qualité de vie, notre bien-être et notre santé est très dépendant de la biodiversité des écosystèmes, de leurs fonctions écologiques et notamment de leur agencement spatial sur le territoire (Mitchell et al., 2015). Afin de conserver de façon durable les bienfaits de ces milieux naturels, il est primordial de prendre conscience des conséquences de chacune de nos actions sur le paysage et son fonctionnement, comme c'est le cas avec l'étalement urbain. Il existe désormais des outils de planification et d'aménagement du territoire très avancés, capables de s'adapter à différents objectifs et à différents contextes socio-environnementaux. Puisqu'ils favorisent une gestion intégrée et durable, ces outils peuvent être utilisés par les décideurs comme aide à la prise de décisions, afin de s'assurer de ne pas perdre les IN à haute valeur de conservation. Plus les milieux naturels contributeurs sont conservés et protégés au sein des réseaux d'IN, plus ils génèrent de bénéfices variés pour la société, minimisant ainsi les compromis potentiels quant aux investissements à faire et à la stratégie d'aménagement à adopter. De tels engagements de conservation doivent désormais être pris par la CMM et la Ville de Montréal afin de lutter contre les changements globaux.

Références

- Acreman, M., Holden, J., 2013. How wetlands affect floods. *Wetlands* 33, 773–786. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0473-2>
- Albert, C.H., Rayfield, B., Dumitru, M., Gonzalez, A., 2017. Applying network theory to prioritize multi- species habitat networks that are robust to climate and land-use change. *Conserv. Biol.* 31, 1383–1396. <https://doi.org/10.1111/cobi.12943>
- Austin, G., 2014. *Green infrastructure for landscape planning: Integrating human and natural systems*. Routledge.
- Bassut, J., 2016. *New Solutions for Sustainable Stormwater Management in Canada*.
- Benedict, M.A., McMahon, E.T., 2006. *Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century*. Recreation May, 4–7. <https://doi.org/10.4135/9781412973816.n70>
- Bernstien, J., Rocha, R., 2017. *Montreal flood-zone map for hard-hit Pierrefonds is decades out of date*. CBC News.
- Bissonnette, J.-F., Dupras, J., Messier, C., Lechowicz, M., Dagenais, D., Paquette, A., Jaeger, J.A.G., Gonzalez, A., 2018. Moving forward in implementing green infrastructures: Stakeholder perceptions of opportunities and obstacles in a major North American metropolitan area. *Cities* 81, 61–70.
- CERFO - Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy Inc, 2013. *Identification et localisation des îlots de chaleur et de fraîcheur pour tout le Québec urbain*. Note technique, 8p.
- Chao, A., Jost, L., 2012. Coverage-based rarefaction and extrapolation: Standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology* 93, 2533–2547. <https://doi.org/10.1890/11-1952.1>
- Claeyssen, E., Labrecque, M., 2014. *Modulation de la température d'un mur par les arbres isolés et les haies*. Rapport présenté à Hydro-Québec. Institut de recherche en biologie végétale. Montréal, Québec.
- CMM - Communauté métropolitaine de Montréal, 2011. *Un Grand Montréal attractif, compétitif et durable*. Plan métropolitain d'aménagement et de développement.
- Commission de l'aménagement de la CMM, 2017. *Portrait des inondations printanières de 2017 sur le territoire métropolitain, du cadre légal et des règles applicables en matière d'aménagement de développement du territoire pour les plaines inondables*.
- Da Silva, L., Gosselin, C.-A., Simard, C., Logan, T., 2018. *Le coût de l'inaction face aux impacts des changements climatiques - Agglomération de Québec*. Rapport présenté à la Ville de Québec. 15p.
- Donovan, G.H., Butry, D.T., Michael, Y.L., Prestemon, J.P., Liebhold, A.M., Gatzliolis, D., Mao, M.Y., 2013. The relationship between trees and human health: evidence from the spread of the emerald ash borer. *Am. J. Prev. Med.* 44, 139–145.
- Dupras, J., Alam, M., 2015. Urban Sprawl and Ecosystem Services: A Half Century Perspective in the Montreal Area (Quebec, Canada). *J. Environ. Policy Plan.* 17, 180–200. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2014.927755>
- Dupras, J., Drouin, C., André, P., Gonzalez, A., 2015. Towards the establishment of a green infrastructure in the region of Montréal (Quebec, Canada). *Plan. Pract. Res.* 30, 355–375.
- Dupras, J., L'Ecuyer-Sauvageau, C., Auclair, J., He, J., Poder, T., 2016b. *Natural Capital the Economic Value of the National Capital Commission's Green Network*. National Capital Commission / David Suzuki Foundation.
- Dupras, J., Marull, J., Parcerisas, L., Coll, F., Gonzalez, A., Girard, M., Tello, E., 2016a. The impacts of urban sprawl on ecological connectivity in the Montreal Metropolitan Region. *Environ. Sci. Policy* 58, 61–73. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2016.01.005>
- Environnement et Changement climatique Canada, 2016. *Mise à jour technique des estimations du coût social des gaz à effet de serre réalisées par Environnement et Changement climatique Canada*.
- Feltmate, B., 2016. *Climate change and the preparedness of Canadian provinces and Yukon to limit potential flood damage*. Intact Centre on Climate Adaptation. University of Waterloo, Ontario. 116p.
- Frédette, C., Labrecque, M., Comeau, Y., Brisson, J., 2018. *Evapotranspiration rate of willow (Salix sp.): A review*.

- Giguère, M., 2009. *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Institut National de Santé publique du Québec. 77 p.
- Gonzalez, A., Thompson, P., Loreau, M., 2017. Spatial ecological networks: planning for sustainability in the long-term. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 29, 187–197.
- Hirabayashi, S., 2014. *i - Tree Canopy Air Pollutant Removal and Monetary Value Model Descriptions 2010*, 1–11.
- Houbart, C., Hénault-Ethier, L., 2018. Moins de béton, plus de végétation dans les municipalités : une opportunité pour les horticulteurs. *Québec Vert* 67–71.
- Houde-Roy, L., 2018. *La Ville pressée de mettre à jour les zones inondables*. J. Montréal.
- Jencso, K.G., McGlynn, B.L., Gooseff, M.N., Wondzell, S.M., Bencala, K.E., Marshall, L.A., 2009. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: Transferring reach- and plot-scale understanding to the catchment scale. *Water Resour. Res.* 45, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2008WR007225>
- Jones, H.P., Hole, D.G., Zavaleta, E.S., 2012. Harnessing nature to help people adapt to climate change. *Nat. Clim. Chang.* 2, 504. <https://doi.org/10.1038/nclimate1463>
- Laliberté, E., Legendre, P., 2010. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology* 91, 299–305.
- McMichael, A.J., Woodruff, R.E., Hales, S., 2006. Climate change and human health: Present and future risks. *Lancet* 367, 859–869. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)68079-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)68079-3)
- MDDELCC - Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques, 2018b. *Les plans régionaux des milieux humides et hydriques*.
- MDDELCC - Ministère du Développement durable de l'Environnement et la Lutte contre les changements climatiques, 2018a. *L'eau au Québec : une ressource à protéger*. URL <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/eau/inter.htm>
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J., Zhao, Z.-H., 2007. Global climate projections, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K., Marquis, M., Chen, Z., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis, Ecosystems*. Island Press, Washington, DC. <https://doi.org/10.1196/annals.1439.003>
- Mitchell, M.G.E., Bennett, E.M., Gonzalez, A., Lechowicz, M.J., Rhemtulla, J.M., Cardille, J.A., Vanderheyden, K., Poirier-Ghys, G., Renard, D., Delmotte, S., Albert, C.H., Rayfield, B., Dumitru, M., Huang, H.H., Larouche, M., Liss, K.N., Maguire, D.Y., Martins, K.T., Terrado, M., Ziter, C., Taliana, L., Dancose, K., 2015. The montérégie connection: Linking landscapes, biodiversity, and ecosystem services to improve decision making. *Ecol. Soc.* 20. <https://doi.org/10.5751/ES-07927-200415>
- Moilanen, A., 2007. Landscape zonation, benefit functions and target-based planning: unifying reserve selection strategies. *Biol. Conserv.* 134, 571–579.
- Moilanen, A., 2008. Generalized complementarity and mapping of the concepts of systematic conservation planning. *Conserv. Biol.* 22, 1655–1658.
- Moilanen, A., Leathwick, J.R., Quinn, J.M., 2011. Spatial prioritization of conservation management. *Conserv. Lett.* 4, 383–393.
- MRNF - Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec, 2008. *Base de données topographiques du Québec*.
- MRNF - Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec, 2009. *Normes de cartographie écoforestière - Troisième inventaire écoforestier*.
- Nakicenovic, N., Swart, R., 2000. *Emissions scenarios. Special report of the Intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Nazarnia, N., Schwick, C., Jaeger, J.A.G., 2016. Accelerated urban sprawl in Montreal, Quebec City, and Zurich: Investigating the differences using time series 1951–2011. *Ecol. Indic.* 60, 1229–1251.
- Observatoire du Grand Montréal, 2011. *Couvert forestier : PMAD* : cartes 20,21, 22 et 24. URL <http://cmm.qc.ca/donnees-et-territoire/observatoire-grand-montreal/produits-cartographiques/donnees-georeferences/>
- Ouranos, 2018. *Portraits climatiques*. URL <https://www.ouranos.ca/portraitsclimatiques/#/> (accessed 9.15.18).
- Ouranos, 2015. *Vers L'adaptation: Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Montréal, Québec.
- Paquette, A., 2016. *Augmentation de la canopée et de la résilience de la forêt urbaine de la région métropolitaine de Montréal*. Montréal.
- Poder, T.G., Dupras, J., Ndefo, F.F., He, J., 2016. The Economic Value of the Greater Montreal Blue Network (Quebec, Canada): A Contingent Choice Study Using Real Projects to Estimate Non-Market Aquatic Ecosystem Services Benefits. *PLoS One* 11, e0158901.
- Rayfield, B., Dupras, J., Francoeur, X., Dumitru, M., Dagenais, D., Vachon, J., Paquette, A., Lechowicz, M., Messier, C., Gonzalez, A., 2015. *Les infrastructures vertes : Un outil d'adaptation aux changements climatiques pour le Grand Montréal*. Rapport présenté à la Fondation David Suzuki. Montréal, Québec.
- Rayfield, B., Pelletier, D., Dumitru, M., Cardille, J.A., Gonzalez, A., 2016. Multipurpose habitat networks for short-range and long-range connectivity: A new method combining graph and circuit connectivity. *Methods Ecol. Evol.* 7, 222–231. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12470>
- Rocha, R., 2017. *What are flood maps, and why are they important?* CBC News.
- Sutton-Grier, A.E., Wowk, K., Bamford, H., 2015. Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environ. Sci. Policy* 51, 137–148. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2015.04.006>
- Tischendorf, L., Fahrig, L., 2000. On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos* 90, 7–19. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900102.x>
- USDA Forest Service, 2018. *i-Tree Software Suite v6.0.10* Online. URL <https://www.itreetools.org> (accessed 7.18.18).
- World Bank, 2009. *Convenient Solutions to an Inconvenient Truth: Ecosystem-based Approaches to Climate Change*.

