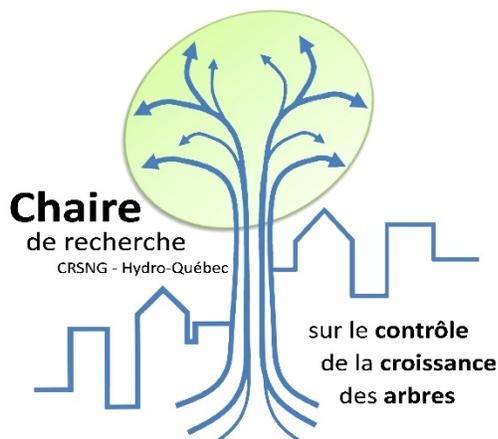

L'approche fonctionnelle

Méthodologie et guide
d'utilisation – Formation
créditée

Elyssa Cameron, Alain Paquette

UQÀM

cef
Centre d'étude de la forêt



Fondsvert

OURANOS

À noter que l'utilisation de ce guide sert de complément à la formation offerte par l'UQAM. Toute propriété intellectuelle appartient ainsi aux auteurs de ce guide d'utilisation et devrait être citée lors de l'utilisation et de la distribution de concepts qui y sont liés.

Cette première formation sert à introduire le participant aux concepts clés sur lesquels l'approche fonctionnelle est construite. Elle porte sur l'intérêt, l'utilisation et les bénéfices d'une telle approche tout en la comparant aux méthodes historiquement utilisées en milieu urbain.

Finalement, elle présente au participant des outils simplifiés pour pouvoir déterminer, interpréter et appliquer les résultats de l'approche fonctionnelle.

Une deuxième formation est présentement en conception et servira à approfondir les connaissances pour bien intégrer l'approche fonctionnelle dans les milieux urbains. Cette formation présentera des scénarios sur l'intégration des contraintes d'esthétique, d'acceptabilité et de disponibilité, en plus d'approfondir certaines considérations particulières en parcs et en rues, tout en respectant les principes de l'approche fonctionnelle. Elle couvrira également des sujets écologiques plus approfondis, notamment la diversité verticale et les services écosystémiques (présence, maximisation et calculs).

Veuillez communiquer votre intérêt pour les formations à Elyssa Cameron :

cameron.elyssa@uqam.ca

Remerciements

Cette formation est basée sur les travaux de Alain Paquette et Christian Messier initiés grâce à la participation d'Ouranos à titre de partenaire scientifique et financier et du gouvernement du Québec à titre de partenaire financier via le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec, de même que la Chaire de recherche CRSNG – Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance de l'arbre. La méthode présentée ici a d'abord été publiée grâce au support du Jour de la Terre Québec sous la forme de guide que l'on peut trouver ici : <http://www.arbresurbains.uqam.ca/fr/guidereboisement/guide.php>

1.0 Présentation des concepts clés

Historiquement, la plantation (le choix des essences et de leur distribution) d'arbres dans les villes était basée sur des critères d'esthétisme, d'acceptabilité par les citoyens et de tolérance envers les stress particuliers rencontrés en ville (sel, compaction, pollution). Face aux défis actuels et futurs (insectes, maladies exotiques et accélération des changements climatiques), il est nécessaire de revoir les façons de faire pour assurer que les arbres plantés aujourd'hui puissent se développer et fournir les nombreux services écologiques attendus. Voici donc quelques concepts clés qui seront utilisés au cours de cette formation :

1.1 Résilience

La résilience se définit comme la capacité d'un écosystème, d'un habitat, d'une communauté, d'une population ou d'une espèce à retrouver un fonctionnement et un développement normal après une perturbation importante. La résistance, en comparaison, se définit comme la capacité d'un arbre, d'un groupe d'arbres dans une rue ou un quartier, ou d'une forêt, à résister à un stress. Ainsi, dans une forêt résiliente, des réorganisations de composition ou de structure, des pertes de vigueur des arbres ou même des mortalités pourraient avoir lieu, mais les biens et services n'en seraient que peu affectés en raison de la diversité fonctionnelle et de la complexité structurale (définie plus bas) de la forêt.

Selon de nouvelles avancées en science de la complexité, les écosystèmes, y compris les forêts urbaines, sont définis comme des systèmes complexes. La résilience est une propriété importante de ces ensembles, et fait référence à la capacité d'un écosystème à absorber des changements tels que les perturbations et à maintenir ou récupérer ses structures et fonctions principales par la suite. Les concepts de système complexe et de résilience pour la forêt et les arbres sont relativement nouveaux, surtout en milieu urbain, mais ils sont de plus en plus utilisés dans d'autres domaines, notamment en économie, dans les sciences sociales et en médecine. Une plus grande résilience doit être incorporée dans les critères des plantations afin d'augmenter leur qualité et leur rendement en services, et surtout la probabilité qu'elles pourront continuer à rendre ces services malgré les changements globaux. Un des piliers de la science de la complexité et de la résilience des systèmes complexes est la diversification.

En effet, les plantations devraient comporter des espèces d'arbres tolérantes aux vents violents, à la sécheresse, aux inondations, aux froids intenses, aux redoux soudains en hiver, aux insectes et maladies exotiques, etc. Puisqu'aucune espèce d'arbre ne peut résister à tous ces stress, l'exposition aux risques doit être minimisée en augmentant la diversité d'arbres des parcs urbains, ce que la science écologique appelle « l'effet de portefeuille » en référence au phénomène bien connu de la diversification des portefeuilles financiers.

1.2 Redéfinir la biodiversité pour l'augmenter

Il existe plusieurs façons de mesurer la diversité des espèces, la plus connue étant simplement le dénombrement des espèces présentes dans un espace donné : la richesse spécifique. De meilleures alternatives existent, notamment en calculant un « nombre effectif d'espèces » (NEE), soit un indice de richesse qui tient compte de l'abondance relative des espèces dans l'estimation de la diversité. Par exemple, l'exposant de l'entropie de Shannon (1D) (Jost 2006) est une fonction mathématique qui correspond intuitivement à la quantité d'information contenue dans un ensemble (par exemple, un chapeau avec des coupons à tirer au hasard, la base de données des arbres d'une ville) ou, en d'autres mots, la « surprise » moyenne fournie par

l'observation d'un échantillon tiré d'une population. Plus l'entropie est élevée, plus l'information (c.-à-d. le nombre effectif d'espèces) est élevée; c'est-à-dire que la communauté est composée d'une grande diversité d'espèces, mais surtout que ces dernières sont bien réparties. Cet indice donne un « nombre effectif d'espèces » (NEE), soit une quantité directement comparable entre différents échantillons (des quartiers, par exemple).

1.3 Ratio 10-20-30

Une règle intéressante a été proposée dans l'espoir de favoriser la diversité et la résilience de la forêt urbaine, soit la règle dite du 10-20-30 (Santamour 1990)¹. Cette règle propose qu'il ne faille jamais planter les arbres d'un secteur donné dans des proportions de plus de 10% de la même espèce, 20% du même genre, et 30% d'une même famille. Cette « règle du pouce » a l'avantage d'être simple et d'identifier rapidement les problèmes importants, mais ne permet pas de comparaisons directes sur une échelle continue de façon à mesurer la distance à l'atteinte d'un objectif. Récemment, il a été démontré que seule l'abondance relative de l'espèce la plus utilisée en ville est un prédicteur efficace de la diversité pondérée totale (mesurée à l'aide de l'indice de Shannon) (Kendal et al. 2014). Ces résultats révèlent le manque d'uniformité dans la distribution des espèces tel que mentionné précédemment. La règle de Santamour permet quant à elle de mettre des chiffres sur l'idée généralement acceptée qu'il serait au minimum souhaitable d'éviter les monocultures, et que des espèces du même genre ou de la même famille sont susceptibles d'être affectées par des problèmes similaires (stress, pathogènes, etc.). Cependant, l'inverse peut également être vrai, c'est-à-dire que des espèces très éloignées dans la phylogénie (évolution) peuvent présenter des caractéristiques et vulnérabilités semblables; ce phénomène se nomme « convergence évolutive » (Paquette et al. 2015). Par exemple, l'érable à sucre et l'érable de Norvège, deux espèces proches, sont toutes deux tolérantes à l'ombre, mais c'est aussi le cas du sapin baumier, qui est pour sa part très éloigné des érables d'un point de vue évolutif et botanique.

La règle de Santamour est donc imparfaite puisqu'elle ne tient pas compte des véritables ressemblances entre les espèces. Ainsi, une section de forêt urbaine pourrait être dite diversifiée selon cette règle et respecter les seuils 10-20-30, mais présenter quand même un risque élevé si les espèces sont semblables du point de vue de leurs caractéristiques, au-delà de leur appartenance à un genre ou une famille botanique. C'est cette lacune que tente de combler l'approche fonctionnelle.

1.4 Diversité fonctionnelle

Les espèces, végétales comme animales, développent toutes sortes de caractéristiques biologiques (traits) bien particulières leur permettant de survivre et de croître dans des conditions diverses, voire extrêmes. À toute niche écologique correspond un ensemble de traits. Une approche fonctionnelle permet d'aller au-delà du simple nombre d'espèces présentes et de tenir compte des caractéristiques fonctionnelles, structurales, morphologiques et horticoles des espèces en lien avec les services qu'elles fournissent et les stress présents et à venir. Ces caractéristiques peuvent référer au port, à la densité du bois, au feuillage ou à divers indices de tolérance des espèces, par exemple. Cette façon de faire permet de mieux quantifier ce qui

¹ On crédite habituellement la règle du 10-20-30 au Dr. Frank Santamour, aujourd'hui décédé, mais il n'en est pas l'auteur. Il a présenté cette règle en 1990 en conférence, lors de laquelle il a dit "I am not sure who first propounded the 10% rule, nor am I sure that anyone would want to take credit for it, but it is not a bad idea." (Santamour 1990).

paraît comme une évidence, par exemple que deux érables (p. ex. argenté et rouge) formeront une communauté moins diversifiée qu'un érable et une épinette (Figures 1; 2). Elle permet aussi de quantifier ce qui est moins évident, par exemple qu'un cerisier et un chêne forment une communauté moins diversifiée du point de vue fonctionnel qu'un chêne et un tilleul (ce qui sera discuté plus loin). En retour, cette quantification permet de mieux définir des objectifs de diversification, et de quantifier la différence à combler pour les atteindre.

La diversité fonctionnelle est donc la diversité des caractéristiques des espèces qui sont importantes pour le fonctionnement d'une communauté. Elle peut être définie comme la diversité des traits fonctionnels, soit les caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologiques d'un organisme ayant un effet sur sa performance individuelle, et déterminant ainsi sa réponse à un ou plusieurs facteurs environnementaux. Elle peut être reliée à la notion de résilience des écosystèmes. L'émergence de cette facette de la diversité biologique s'appuie sur le constat que la diversité fonctionnelle explique mieux le fonctionnement des écosystèmes que les autres mesures classiques de diversité, étant plus près des mécanismes, comme la partition de niche².

Prenons par exemple les deux communautés de la Figure 1. Les arbres de la communauté du haut, peu diversifiée, se font compétition pour les mêmes ressources aux mêmes endroits et au même moment, et sont sensibles aux mêmes stress. Cette communauté serait donc moins performante et moins résiliente. Celle du bas présente au contraire un meilleur partage de l'espace aérien et sous-terrain, et donc des ressources (c.-à-d. une meilleure partition de niche), et sera mieux en mesure de performer, même sous des conditions de stress environnementaux importants. Elle est donc supposée plus résiliente par effet de portefeuille.

La diversité fonctionnelle s'intéresse aux distances fonctionnelles entre les espèces, et donc à la variance entre les valeurs de traits plutôt qu'à leur moyenne. Ainsi, la diversité des traits est le reflet de la diversité des multiples stratégies présentes dans une communauté (et donc de sa résilience). Par exemple, la taille des semences, un trait souvent utilisé dans ce type d'étude sur les arbres, n'est peut-être pas une valeur intéressante en soi, mais elle est le reflet fidèle de stratégies évolutives des espèces, distinguant par exemple les espèces pionnières à croissance rapide de celles de fin de succession.

² Pour un exemple, voir Paquette et Messier (2011), dans lequel cet effet est démontré pour les forêts naturelles du Québec.

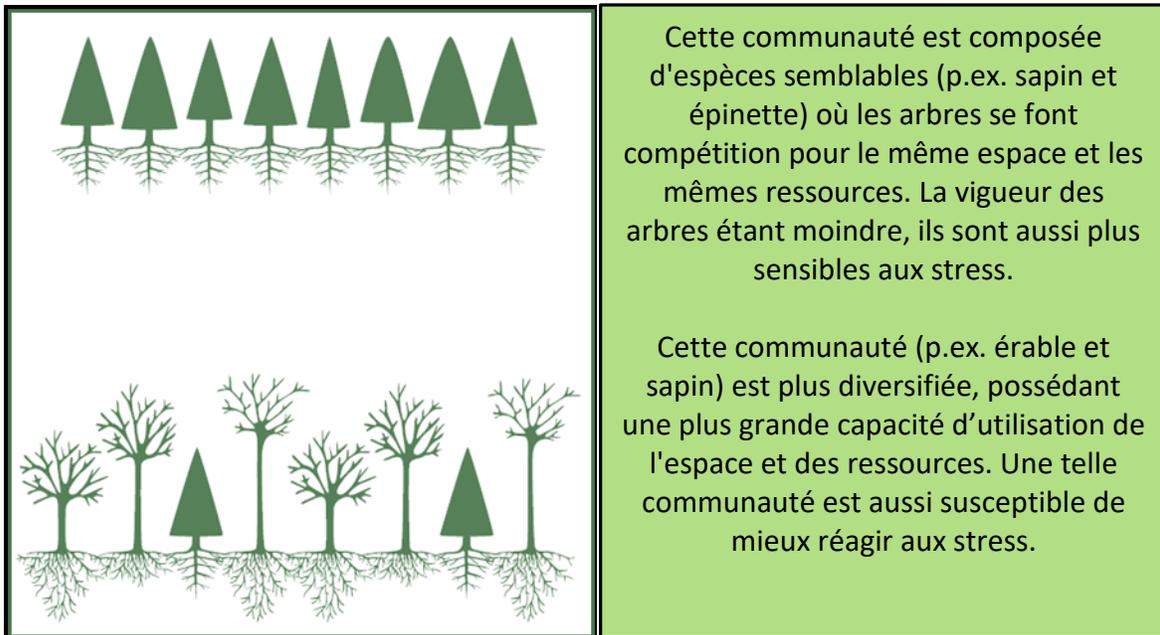


Figure 1. Représentation graphique du concept de diversité fonctionnelle³

La diversité fonctionnelle représente aussi la variété des réponses exprimées par les espèces d'une communauté (un parc, une section de rue, etc.) suite à un changement touchant leur environnement. Plus la diversité fonctionnelle est grande, plus il y a de chances que certaines espèces réagissent bien à une altération de l'environnement, donc plus l'écosystème est stable (effet de portefeuille). Dans le cadre de cette formation, les indices de diversité fonctionnelle sont basés sur la distance entre les espèces dans un « volume fonctionnel » (l'espace multidimensionnel basé sur les valeurs de traits de toutes les espèces) (Laliberté et Legendre 2010). La distance fonctionnelle est simplement, de façon imagée, la différence entre les valeurs de traits des espèces d'une communauté. À partir de ces distances, il est possible de calculer des indices de diversité fonctionnelle, soit en quelque sorte la distance moyenne entre les espèces du mélange. La Figure 2 présente ces calculs sous forme schématique. Il est à noter que l'approche proposée ne requiert pas du praticien le calcul de ces indices. Ces derniers sont présentés à titre informatif seulement.

³ Adapté avec permission de Paquette et Messier (2013).

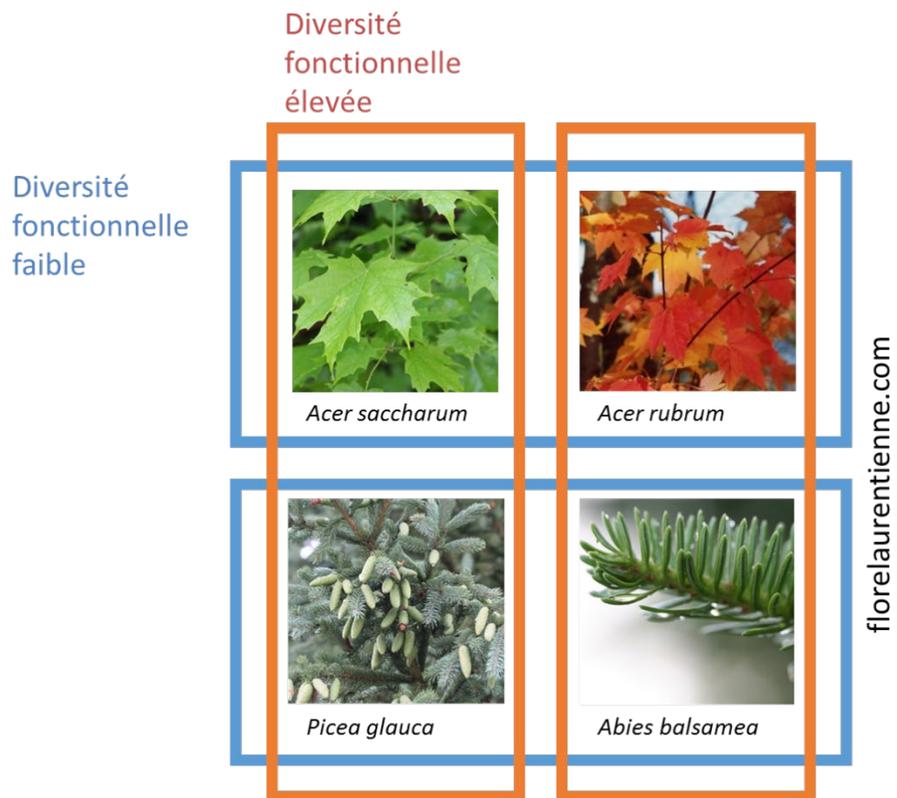
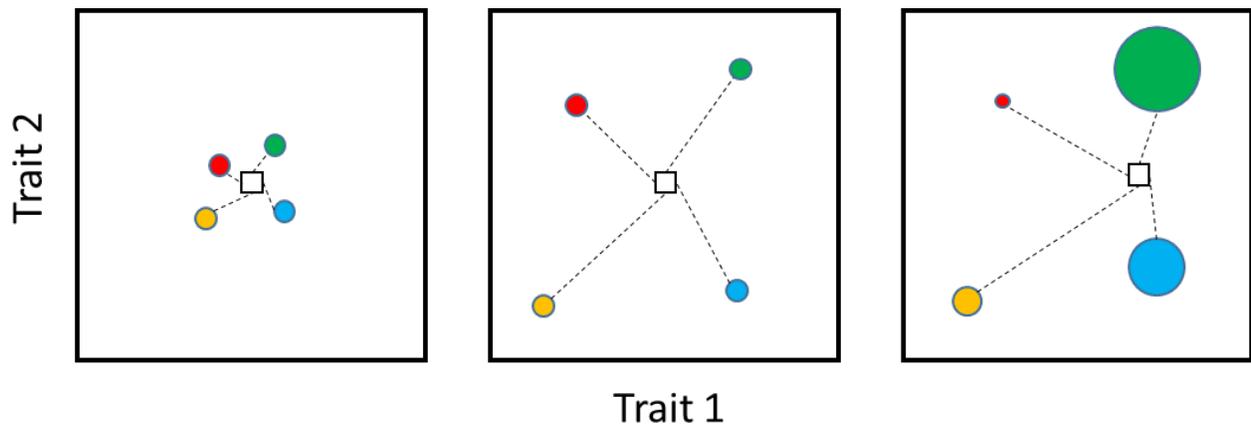


Figure 2. Schéma du calcul de la diversité fonctionnelle (indice FDis). En haut, le cas simple de deux traits fonctionnels et de l'indice FDis. La surface représente le « volume fonctionnel » défini par les deux dimensions (traits). Les points représentent les espèces placées dans ce volume selon la valeur de leurs traits. La diversité fonctionnelle est la moyenne des distances (traits pointillés) de chaque espèce avec le centre de masse (carré blanc - moyenne). À gauche, une communauté de 4 espèces semblables. Au centre, une communauté toujours de 4 espèces, mais fonctionnellement différentes. À droite, l'abondance relative des espèces est ajoutée pour pondérer leurs importances relatives; une espèce abondante est plus « lourde » et tire sur la moyenne. En bas, un exemple à l'aide de deux érables (rouge et à sucre) et deux conifères (épinette et sapin).

1.5 Les groupes fonctionnels

Il existe une autre technique reliant la diversité fonctionnelle et les ratios de Santamour : l'utilisation des groupes fonctionnels (Mason et al. 2005). Il s'agit d'une façon beaucoup plus simple de travailler avec la diversité fonctionnelle. En bref, les espèces sont regroupées selon leurs ressemblances et susceptibilités, et des listes d'espèces appartenant à chacun des groupes sont formées. Il est ensuite possible, à partir d'analyses des conditions d'un milieu, de faire plus facilement des choix de plantations garantissant une diversité optimale plutôt que de se fier à un simple nombre d'espèces. La technique est ainsi aussi simple d'utilisation que les ratios 10-20-30 et procède selon la même logique, mais est construite sur des bases plus solides à l'aide des distances fonctionnelles.

Plus précisément, des groupes homogènes d'espèces basés sur leurs traits fonctionnels doivent être formés à l'aide de techniques de groupement hiérarchique basées sur les distances fonctionnelles. En d'autres termes, on regroupe ensemble les espèces qui se ressemblent d'un point de vue strictement basé sur leurs traits (la distance fonctionnelle), et non selon leur genre ou famille.

Cette approche est donc fonctionnelle, puisqu'elle ne fait aucunement référence à l'appartenance d'une espèce à un genre ou une famille. Ainsi, deux espèces du même genre peuvent et doivent se retrouver dans des groupes différents si elles sont distinctes du point de vue de leurs traits fonctionnels. Prenons comme exemple deux cornouillers: *Cornus canadensis* et *Cornus nuttallii* (Figure 3). Le premier, commun dans les forêts du Québec, fait environ 10 cm et se comporte comme une plante de sous-bois. Le second est un arbre qui atteint 18 m. Il va de soi que ces espèces n'occupent pas la même niche, utilisent des ressources différentes, et ont conséquemment des traits différents. Pourtant, elles proviennent d'un ancêtre commun relativement proche et appartiennent au même genre botanique.

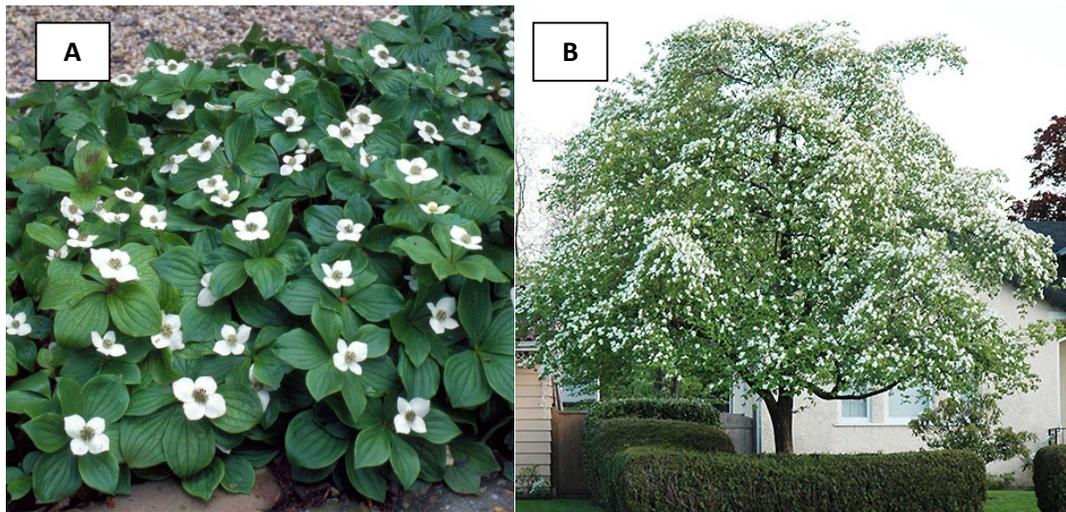


Figure 3. Comparaison des espèces *Cornus canadensis* (A) et *Cornus nuttallii* (B)

La systématique utilise des caractères botaniques (et plus récemment l'information génétique) ayant fait leurs preuves pour classer les plantes en genres, familles, etc. Il s'agit presque toujours de caractéristiques de l'appareil reproducteur, telles que le nombre, la taille et l'arrangement des pétales. Alors que ces caractères exposent clairement l'origine évolutive

d'une espèce – car ils sont très stables dans le temps, comme l'ADN qui code pour un gène – ils renseignent très peu sur les pressions évolutives qui ont suivi et qui ont transformé ces espèces, parfois de façon très prononcée. C'est là qu'entrent en jeu les traits fonctionnels, qui sont directement liés à la niche qu'occupe une espèce, à ses fonctions dans l'écosystème, et à la façon dont elle interagit avec les autres espèces et son environnement. En d'autres mots, les fleurs et l'ADN indiquent d'où vient une espèce, et les traits fonctionnels révèlent par où elle est passée depuis et la place qu'elle occupe aujourd'hui.

Étant donné sa complexité technique, le calcul des indices de diversité fonctionnelle n'est probablement pas un exercice auquel voudront se livrer les gestionnaires municipaux. De plus, il est peu utile pour des fins de communication, par exemple pour informer les citoyens sur les intentions de la ville, les guider dans leur choix d'espèce ou encore pour informer les pépinières des besoins de la municipalité.

C'est donc dans ce cas que l'approche par groupe fonctionnel prend tout son sens. Une fois les groupes produits et rendus disponibles sous forme de listes, il est aisé de calculer les proportions des effectifs totaux (c.-à-d. nombre effectif de groupe (NEG)) appartenant à chaque groupe et ainsi détecter les problèmes (p.ex. un groupe trop abondant) et les solutions possibles. Ces listes sont aussi parfaitement adaptées pour aider les gestionnaires et citoyens à faire de meilleurs choix, et informer les pépinières des intentions d'achat de la ville pour les prochaines années.

2.0 Méthodologie pour la création des groupes fonctionnels

Cette section est présentée à titre d'information seulement pour ceux qui désirent en apprendre davantage sur la construction des groupes fonctionnels. Ces informations ne seront couvertes que de façon très générale dans la formation et la compréhension des calculs n'est pas nécessaire pour pouvoir adéquatement appliquer l'approche fonctionnelle.

Pour information, les traits fonctionnels utilisés pour constituer les groupes sont présentés au Tableau 1. L'analyse des traits des espèces retrouvées dans la grande région de Montréal a produit 10 groupes fonctionnels distincts (Figure 4). Le Tableau 2 illustre les principales espèces représentées dans chaque groupe ainsi que leurs caractéristiques communes et permettra d'interpréter les résultats. Pour consulter la liste de toutes les espèces et le groupe fonctionnel attribué à chacune d'elles, visitez :

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

Des informations décrivant les caractéristiques de chacun des groupes fonctionnels y sont aussi présentées. Les paragraphes suivants traiteront de façons pour rendre ces approches novatrices applicables dans la gestion des plantations municipales.

2.1 Les traits fonctionnels

Contrairement aux indices précédents, la diversité fonctionnelle ne fait pas référence à l'identité des espèces, mais est plutôt construite sur leurs caractéristiques, ou traits fonctionnels. Cette approche permet de mesurer l'ampleur des différences au niveau des fonctions ou caractéristiques écologiques, ou « distance fonctionnelle » entre deux espèces. Comme on s'intéresse directement aux caractéristiques des espèces, ces indices nous permettent aussi d'évaluer le risque auquel une communauté d'arbres est exposée. Cela est entre autres basé sur le fait que des arbres semblables sont susceptibles d'être affectés en même temps par le même

agent perturbateur (un stress ou une maladie, par exemple). Par exemple, les espèces peu tolérantes à la sécheresse seront toutes affectées par une diminution des précipitations dans le futur causé par les changements climatiques.

Tableau 1. Valeur moyenne des traits fonctionnels utilisés dans cette étude pour chacun des groupes fonctionnels.

Groupe	Semences	Bois	LMA	[N]	Ombre	Sécheresse	Inondation	AM	ECM	Dispersion
1A	11	0.36	218	1.3	4.0	2.2	1.4	0.3	0.8	V
1B	122	0.42	277	1.3	1.6	3.7	1.5	0.2	0.9	VA
2A	146	0.50	64	2.0	3.6	2.4	1.5	0.7	0.4	VA
2B	11868	0.45	73	2.4	3.6	2.5	1.5	1	0	B
2C	45	0.52	69	2.3	3.0	2.5	2.8	0.9	0.2	VA
3A	86	0.62	86	1.6	2.3	3.1	1.6	0.9	0.5	AE
3B	185	0.50	71	2.2	2.2	2.9	1.3	1	0.1	AV
4A	4272	0.59	76	2.3	2.3	3.2	1.8	0.2	0.9	A
4B	2483	0.52	71	3.3	1.8	4.4	1.5	0.9	0.1	AHBV
5	1.88	0.40	76	2.4	1.7	2.0	2.8	0.6	0.8	VA
Moyenne	845	0.49	100	2.1	2.6	2.7	1.9	271	271	271

Notes : masse des Semences (mg); densité du Bois (g cm^{-3}); LMA : masse foliaire spécifique (g m^{-2}); [N] : contenu en azote des feuilles (%); Tolérance à l'Ombre, à la Sécheresse, et à l'Inondation: échelles de 1 - intolérant - à 5 - tolérant). Présence d'endomycorhizes arbusculaires (AM) ou ectomycorhizes (ECM); mode de dispersion des graines : A-animal (zoochorie); V-vent (anémochorie); H-eau (hydrochorie); B-gravité, non-assistée (barochorie); E-empêchée⁴ (achorie, atelochorie, antitelochorie).

⁴ Dispersion des graines empêchée, par exemple quand la graine germe directement sur le parent, ou dans le sol.

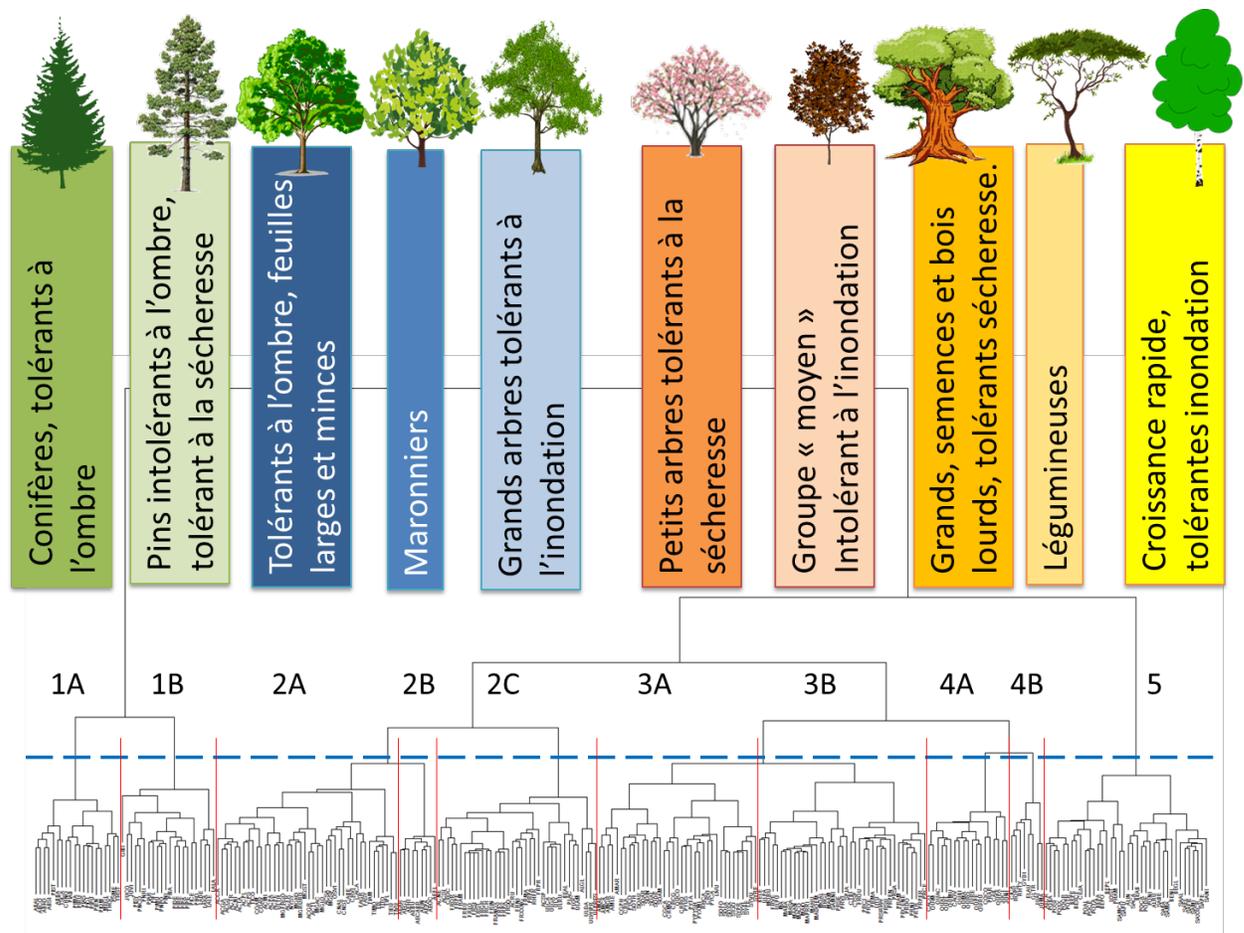


Figure 4. Dendrogramme fonctionnel représentant les 271 espèces et les 5 classes (1, 2, 3, 4 et 5) et 10 groupes (1A, 1B, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B, 4A, 4B et 5) formés par la distribution des traits fonctionnels

La première étape d'analyse des groupes fonctionnels fut donc de constituer une base de données des traits des espèces présentes, soit 271, un nombre très important pour ce type d'étude (peut-être le plus important à ce jour). Dix traits fonctionnels ont été retenus pour cette première phase selon leur importance écologique, leurs effets documentés dans la littérature scientifique sur les forêts (Ruiz-Benito et al. 2014, Paquette et Messier 2011), ainsi que leur disponibilité relative (Tableaux 1 et 2). Un tel nombre de traits correspond fort probablement à la plus grande couverture du genre. Il est également pertinent de rappeler que la diversité fonctionnelle s'intéresse aux distances entre les espèces, et par le fait même à la variance entre les valeurs de traits plutôt qu'à leur moyenne. Ainsi, les traits utilisés sont le reflet de stratégies propres aux espèces, et donc de la diversité des stratégies dans une communauté. Par exemple, la taille des semences en mg n'est pas une valeur intéressante en soi, mais elle reflète les stratégies évolutives, en distinguant par exemple les espèces pionnières à croissance rapide (petites semences en grands nombres) de celles de fin de succession (grosses semences).

Une seule étude sur la diversité des traits a été réalisée en milieu urbain (Nock et al. 2013), et aucune étude ou base de données sur des traits spécifiques aux arbres urbains n'existe à ce

jour. La Chaire de recherche CRSNG/Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance des arbres s'est engagée à continuer ses efforts dans ce sens, notamment en documentant les espèces utilisées en milieu urbain, et en ajoutant des traits liés plus directement aux conditions urbaines (travaux en cours).

Les traits ayant été étudiés sont d'abord la masse des semences (après transformation log) et la densité du bois, qui sont des proxys connus de stratégies écologiques pouvant entre autres distinguer les espèces pionnières des espèces climaciques (Chave et al. 2009, Ackerly et Cornwell 2007). Ces proxys suivent le modèle évolutif de MacArthur et Wilson (1967) employant les stratégies « r » (espèces rudérales; à croissance rapide, avec grande production de petites semences, ...) et « K » (espèces climaciques; à maturité tardive, tolérantes à la compétition, ...) et correspondant à un fort gradient de caractéristiques écologiques fondamentales.

De plus, la tolérance à l'ombre, à la sécheresse et à l'inondation ont été ajoutés. Ces traits sont également liés à la performance en milieu urbain (Niinemets et Valladares 2006). Par exemple, la tolérance à l'inondation est en fait une tolérance aux conditions anaérobiques, semblables à celles créées par la compaction des sols en milieu urbain et expliquant probablement le succès en ville de plusieurs espèces trouvées habituellement en conditions de mauvais drainage, comme l'érable argenté et le frêne de Pennsylvanie.

Deux traits foliaires connus pour leur importance écologique sont aussi présents dans l'étude, soit la masse foliaire spécifique et la teneur en azote (Díaz et al. 2004, Wright et al. 2004). Ces traits ont été utilisés à plusieurs reprises pour démontrer l'existence de « gradients de traits » et de gradients écologiques universels (Reich 2014, Wright et al. 2004).

À ces traits s'ajoutent deux variables binaires codant pour le ou les modes de mycorhization possibles, soit la présence d'endomycorhizes arbusculaires (AM), ou d'ectomycorhizes (ECM) (les deux étant possibles chez certaines plantes). Puisque l'association avec les mycorhizes est liée à l'accès aux nutriments et à l'eau par les plantes, le type d'association et l'intensité de la colonisation des racines reflètent différentes stratégies d'acquisition nutritive des plantes (Hempel et al. 2013). Ces champignons ont un impact significatif sur la morphologie des pointes racinaires et augmentent considérablement la capacité d'absorption du système racinaire des arbres (Comas et Eissenstat 2009). Cependant, les organismes mycorhiziens sont très sensibles. Une forte concentration en ions salins, un pH inapproprié, et des conditions hydriques stressantes affectent leur composition et leur abondance dans le sol.

Le mode de dispersion des graines est un autre trait lié aux stratégies de vie. Ce trait n'est pas directement utile pour la gestion des arbres en milieu urbain, puisque les arbres y sont plantés, mais plutôt pour ce qu'il révèle des différentes stratégies adoptées, qui impliquent plusieurs mécanismes.

À ces traits a été ajouté un 11^e caractère : une variable binaire qui sépare simplement les Angiospermes des Gymnospermes pour optimiser les calculs de distances. Ce « trait » n'a pas été considéré dans les analyses. Enfin, il est à noter que la qualité des calculs a été augmentée en précision à l'aide de poids optimaux pour chacun des traits.

Les valeurs de traits disponibles ont d'abord été relevées grâce aux travaux en forêt naturelle (p. ex. Paquette et Messier 2011) et le réseau d'expériences en biodiversité IDENT (Tobner et al.

2014). Les données ont dû être complétées par une recherche de la littérature étant donné le grand nombre d'espèces exotiques présentes en ville (à Montréal comme ailleurs en Amérique du Nord) (Nock et al. 2013). Dans le cas d'hybrides, les espèces parentes ont été identifiées et documentées.

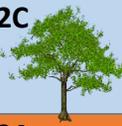
2.2 Caractérisation des groupes fonctionnels

La librairie R (R Core Team 2015) utilisée pour le calcul de l'indice de diversité fonctionnelle (Laliberté et Shipley 2011, Laliberté et Legendre 2010) peut prendre en compte les données manquantes, mais le nombre important d'espèces présentes dans les analyses et le nombre significatif de données manquantes pour les espèces moins fréquentes et peu documentées rendent les calculs difficiles. La solution la plus commune a été utilisée, soit d'appliquer aux données manquantes la valeur moyenne des espèces documentées selon l'ordre hiérarchique suivant : i) proches parentes, ii) du même genre, ou finalement iii) de la même famille (Paquette et al. 2015).

L'analyse par groupement hiérarchique des traits fonctionnels a permis de reconnaître dix groupes d'espèces, qui peuvent être regroupés en cinq classes plus grandes pour faciliter la compréhension et l'utilisation (Figure 4). La qualité des calculs, la précision des groupes, et les perspectives d'utilisation future ont été améliorées par l'ajout d'un grand nombre d'espèces présentes ailleurs au Québec (inventaires de Montréal et Québec en accès libre), pour un total de 271 espèces. Le grand nombre d'espèces rend la lecture de la ligne du bas de la Figure 4 difficile; la liste complète des espèces par groupe se trouve sur le site web de la Chaire⁵. Au Tableau 1, le lecteur trouvera les valeurs moyennes par groupe de chaque trait. Enfin, une interprétation fonctionnelle des groupes est proposée au Tableau 2. Les couleurs et la numérotation des groupes soulignent l'idée importante qu'il existe une plus grande différence entre des membres de classes différentes (un membre de la Classe 1 et un de la Classe 2, par exemple), qu'entre membres de groupes de la même classe (entre les Groupes 1A et 1B, par exemple). Il n'y a par contre pas de gradient entre les classes de 1 à 5, et la distance n'est pas nécessairement plus grande entre 1 et 5 qu'entre 1 et 2, par exemple.

⁵ <http://www.arbresurbains.uqam.ca/fr/guidereboisement/guide.php>

Tableau 2. Interprétation des groupes fonctionnels.

Groupe	Type fonctionnel	Espèces représentatives
1A	 <p>Conifères généralement tolérants à l'ombre, mais pas à la sécheresse ou à l'inondation. Mycorhization ECM et graines dispersées par le vent.</p>	Les épinettes, sapins et thuya, et le pin blanc
1B	 <p>Conifères héliophiles, tolérants à la sécheresse (pins). Mycorhization ECM et graines dispersées surtout par le vent.</p>	Les pins, mélèzes, genévriers, et ginkgo
2A	 <p>Climaciques. Arbres tolérants à l'ombre à feuilles larges et minces, croissance moyenne. Mycorhization mixte et graines dispersées surtout par le vent.</p>	Les plupart des érables, les tilleuls, magnolia, le hêtre, ostryer et quelques autres petits arbres
2B	 <p>Ressemblent à 2A sauf pour les semences très lourdes et dispersées par gravité. Mycorhization AM exclusive.</p>	Les marronniers
2C	 <p>Grands arbres tolérants à l'inondation. Mycorhization AM et dispersion surtout par le vent.</p>	La plupart des ormes, les frênes, micocoulier, érables rouge, argenté, et negundo
3A	 <p>Petits arbres tolérants à la sécheresse, bois lourd, feuilles épaisses, croissance faible. Mycorhization mixte (surtout AM). Zoochorie sauf pour les lilas (achorie).</p>	Rosacées (sorbier, poirier, aubépine et amélanchier), et les lilas
3B	 <p>Groupe « moyen ». Intolérant à l'inondation, mycorhization AM. Dispersées surtout par les animaux.</p>	Grandes Rosacées (cerisier, pommier), Catalpa, Maackia, autres espèces diverses
4A	 <p>Grands arbres à semences et bois lourds. Plusieurs tolérants à la sécheresse. Mycorhization surtout ECM; zoochorie.</p>	Les chênes, noyers, et caryers
4B	 <p>Grande tolérance à sécheresse, mais pas à l'ombre ou à l'inondation. Semences lourdes, feuilles riches. Mycorhization surtout AM et zoochorie.</p>	Les légumineuses (févier, chicot, robinier, gainier)
5	 <p>Espèces pionnières à très petites semences. Croissance rapide, tolérantes à l'inondation, bois léger. Mycorhization mixte (souvent double); anémochorie.</p>	Tous les peupliers, saules, aulnes et bouleaux (sauf jaune)

En résumé (voir les Tableaux 1 et 2 pour les détails), la Classe 1 se compose des conifères, subdivisés en deux groupes : 1A, les tolérants à l'ombre, et 1B, les tolérants à la sécheresse (et tous les traits qui accompagnent ces syndromes). La Classe 2, très grande, contient l'essentiel des arbres classiques que l'on retrouve en ville tels que les érables, les tilleuls et les frênes, qui sont souvent de grands arbres de milieu ou fin de succession en forêt naturelle. Les tolérants à l'ombre forment le Groupe 2A, et les tolérants à l'inondation (et à la compaction) forment le 2C. Les marronniers forment à eux seuls un groupe intermédiaire (2B) assez près de 2A. La Classe 3 regroupe les Rosacées et autres arbres petits et moyens, à bois lourd et grandes semences. Le Groupe 3A est bien défini (tolérants à la sécheresse, bois lourd, feuilles épaisses), mais 3B regroupe des espèces éparées, avec des traits « moyens ». La Classe 4 est petite et composée de grands arbres à bois lourd et grandes semences, tolérants à la sécheresse. Deux groupes se distinguent, avec d'un côté 4A qui contient les chênes, noyers et caryers, et 4B composé essentiellement des grandes légumineuses (*Fabaceae*) et de peu d'espèces. Enfin, la Classe 5, qui n'est pas subdivisée ici (bien que l'analyse montre un potentiel de deux groupes - Figure 4), est formée des espèces pionnières, héliophiles et à croissance rapide, comme les peupliers, saules et bouleaux.

3.0 Application de l'approche fonctionnelle

Au cours de la formation, nous avons examiné les enjeux principaux qui caractérisent nos forêts urbaines. Jusqu'à présent, les deux indices utilisés pour la gestion de nos forêts urbaines (Santamour et nombre effectif d'espèces) soulèvent les mêmes problèmes d'uniformité dans l'utilisation de quelques espèces seulement pour une ville/arrondissement. Cependant, dans le but d'innover au niveau des solutions, une approche basée sur le rôle fonctionnel des arbres au lieu de leur simple classification botanique est ici proposée. L'interprétation des résultats du calcul de cette approche est résumée au Tableau 2. Étant donné les problèmes précédemment relevés, les résultats attendus ne sont pas très différents, mais l'approche sert plutôt à dégager des pistes de solution durables et efficaces.

La Classe 2 est donc celle qui contient les essences utilisées de façon abondante dans beaucoup de villes d'Amérique du Nord (Nock et al. 2013), comme l'érable de Norvège, l'érable argenté et le frêne de Pennsylvanie, mais aussi les tilleuls et les ormes. Ce résultat est très intéressant en soi, pour deux raisons. Premièrement, il illustre de façon éloquente la compétence de cette approche en foresterie urbaine : bien que les espèces de la classe soient d'origines botaniques très différentes, l'approche fonctionnelle reconnaît d'emblée leurs similitudes, qui en font d'ailleurs de bonnes candidates comme arbres urbains. Il est donc possible d'utiliser cette information pour guider la recherche vers d'autres espèces ayant des traits similaires dans le but de diversifier les espèces plantées faisant partie de cette classe. D'ailleurs, la classe et ses groupes, parmi les plus importants en nombre d'espèces, incluent déjà des espèces potentiellement intéressantes en ville. Bien qu'elles appartiennent au même groupe fonctionnel, elles sont au moins de genres et de familles différents (érables, tilleuls et ormes, par exemple).

La Classe 2 souligne aussi le danger inhérent à ne planter que des arbres d'une seule classe : plusieurs des espèces importantes du Groupe 2C sont victimes de problèmes sanitaires importants (l'orme d'Amérique et tous les frênes). Grâce à l'approche par groupe fonctionnel, il devient relativement aisé d'identifier ce problème, et d'envisager des solutions telles que celles qui seront discutées plus loin dans ce document.

Une statistique importante et à fort potentiel pour la foresterie urbaine sera donc la répartition de ces groupes avec pondération des abondances relatives. De même que la diversité taxonomique, l'approche fonctionnelle peut considérer deux indices de diversité : la richesse de groupe fonctionnel et le nombre effectif de groupe fonctionnel (NEG). La richesse fonctionnelle est simplement le nombre de groupes fonctionnels présents dans un quartier. Un coup d'œil rapide nous informe que cet indice souffre du même défaut que la richesse spécifique : il ne considère pas les abondances. Au sein d'une ville/arrondissement, tous les groupes sont typiquement présents aux niveaux analysés par les gestionnaires. Par contre, à une échelle plus fine, le réaménagement d'une rue par exemple, cet indice pourrait tout de même être intéressant, à condition que les abondances soient relativement uniformes.

Une réelle solution réside dans l'utilisation du même indice que pour les espèces, à savoir l'exposant de l'entropie de Shannon appliqué sur les groupes, appelé le « nombre effectif de groupes fonctionnels » (NEG). La surutilisation d'un groupe particulier se traduit par un NEG plus faible et des endroits avec une moindre dominance d'une seule espèce présenteront un meilleur NEG car les arbres sont mieux répartis entre eux. Or, une distribution plus équitable des groupes fonctionnels permet d'obtenir des résultats plus élevés (visant 7 groupes effectifs et plus, sur un potentiel de 10).

Les espèces de la Classe 2 forment souvent, sans surprise, la plus grande classe. Les espèces des quatre autres classes sont présentes dans des proportions beaucoup plus faibles. De façon générale, ce problème est plus notable en rue qu'en parc. L'analyse par groupes fonctionnels montre donc des pistes intéressantes et faciles d'application afin d'améliorer la diversité et la résilience des plantations d'une ville/arrondissement. Augmenter la proportion d'arbres des classes faiblement représentées et diminuer le recours aux espèces de la Classe 2 (ou autre classe dominante) se traduira nécessairement par une augmentation de la diversité fonctionnelle, et conséquemment par une augmentation de la résilience face aux perturbations futures. Au sein de la Classe 2, très grande, il faudra dans la mesure du possible faire des choix différents de ceux actuels, ce qui devrait être relativement aisé.

Avec le tout en tête, nous présentons quelques recommandations générales à prendre en compte dans l'application de l'approche fonctionnelle en milieu urbain.

3.1 Quelques recommandations générales

L'utilisation de l'approche fonctionnelle a toujours comme but de bien représenter chacune des cinq classes afin qu'elles soient toutes présentes dans une proportion plus au moins égale. Par contre, les contraintes et enjeux imposés par la réalité de planter en milieu urbain font en sorte que cet objectif ne puisse pas toujours être atteint⁶. Même s'il est possible de respecter la plupart de ces contraintes en choisissant les espèces à planter, il reste que ce choix est très

⁶ Une deuxième formation portant sur l'intégration des contraintes d'esthétique, d'acceptabilité et de disponibilité, ainsi que des considérations particulières des parcs et des rues est présentement en développement. Elle couvrira également des sujets écologiques plus approfondis, notamment sur la diversité verticale et les services écosystémiques (présence, maximisation et calculs). Communiquez votre intérêt à Elyssa Cameron (cameron.elyssa@ugam.ca).

limité et peu pratique s'il faut respecter toutes ces contraintes en même temps. Il faut alors prioriser de façon à favoriser la diversité fonctionnelle et la résilience.

Les recommandations générales qui suivent tentent de joindre les objectifs de l'approche fonctionnelle tout en tenant compte de la réalité à laquelle font face les gestionnaires.

1- Diminuer la rigidité des contraintes imposées, là où cela est possible, afin d'éviter toute redondance dans la sélection d'espèces des projets futurs.

Même si le milieu urbain représente un environnement potentiellement difficile pour la plantation (contraintes venant de l'environnement lui-même, des citoyens, des objectifs politiques, etc.), il est important de comprendre que plus les contraintes sont intégrées dans le choix des espèces, plus la sélection est limitée. Donc, même s'il est possible de trouver un arrangement d'espèces satisfaisant toutes les contraintes imposées à un gestionnaire tout en assurant une haute diversité fonctionnelle, il est fort probable que les espèces sélectionnées soient les seules options possibles sous ces contraintes. Conséquemment, tous les projets de remplacement et d'amélioration d'arbres auront tendance à planter les mêmes espèces. Cela risque finalement de diminuer la diversité et la résilience à l'échelle du quartier/municipalité/ville car même s'il y a absence d'arrangements monospécifiques, il y aura tout de même une répétition au niveau des communautés d'arbres présentes (5-10 espèces) dans le quartier ou la municipalité.

2- Ramener l'abondance des espèces les plus utilisées à des proportions moins importantes, et, dans la mesure du possible, utiliser pour ce faire des espèces de groupes fonctionnels différents.

Les forêts urbaines sont à présent peu diversifiées avec seulement une classe fonctionnelle (et souvent même un seul groupe fonctionnel) représentant la grande majorité du patrimoine. Dans la grande région de Montréal, c'est la Classe 2 (notamment les frênes et les érables) qui domine dans la plupart des endroits. Il est pourtant facile d'augmenter la diversité et la résilience en utilisant des autres classes ou groupes là où les conditions le permettent. Pour les grands feuillus, il serait intéressant d'aller par exemple dans les Classes 4 et 5 pour les parcs (en évitant les variétés à fort potentiel allergisant, assez nombreuses dans ces groupes). Le territoire aura tout de même toujours besoin des arbres de la Classe 2, qui présentent des caractères intéressants en milieu urbain, ce qui explique leur abondance. Ce groupe a l'avantage de contenir une grande diversité d'espèces qu'il faut mettre à profit; l'utilisation abondante des érables de Norvège, par exemple, est risquée (sans parler de son potentiel envahissant). Il est donc avantageux de choisir d'autres espèces au sein de la même classe.

3- L'utilisation des groupes fonctionnels mal représentés est une opportunité d'améliorer la diversité verticale et de reprendre les pertes de services écosystémiques et de canopée plus rapidement.

Une étude préliminaire est nécessaire pour déterminer les groupes qui sont les moins représentés au sein du territoire à aménager. Ceci peut se faire rapidement, en établissant un

simple pourcentage du total. Ensuite, il suffit simplement de planter, le plus possible, les espèces provenant de ces groupes mal représentés (souvent les classes autres que la Classe 2). Ainsi, le gestionnaire se permet de récupérer plus rapidement les services écosystémiques perdus – en plantant des espèces à croissance rapide (Classe 5) – et même de les augmenter. La Classe 3, par exemple, contient des espèces de petite et moyenne taille qui pourront servir à améliorer la diversité verticale, aussi appelée diversité structurelle, un autre indice de diversité couramment utilisé en écologie forestière. Cette diversité favorise les interactions écologiques entre les espèces d'un écosystème et conséquemment les services environnementaux. Ces interactions entre organismes augmentent la capacité de la forêt à résister aux changements et à s'adapter aux catastrophes écologiques. De plus, la diversité verticale est planifiée par un choix judicieux des espèces. Un exemple serait d'utiliser des arbres à petit et grand développement. Comme la Classe 3 se compose largement d'arbres de petite ou moyenne taille, ces derniers accompagneraient bien les grands arbres déjà plantés afin que la diversité verticale soit améliorée et les services écosystémiques augmentés.

4- Communiquer aux pépinières ses besoins pour les prochaines années en espèces venant de groupes fonctionnels différents afin de pouvoir atteindre les cibles de diversification.

Un effet attendu des recommandations 2 et 3 est de s'assurer d'obtenir plus facilement une meilleure répartition des espèces, et d'éviter la surutilisation de certaines. Les listes, mises à jour régulièrement par la Chaire⁷, permettront aussi de mieux communiquer ses intentions aux fournisseurs de façon à s'assurer d'avoir les effectifs nécessaires dans les années à venir.

5- L'approche par groupe fonctionnel devra permettre une sélection d'espèces en fonction de ce qui est déjà en place (dans le cas de remplacements) et des conditions locales, en puisant par exemple dans un minimum de deux groupes pour une section de rue donnée (et à des échelles plus importantes).

Il a été mentionné qu'il faut éviter d'avoir recours aux espèces de la Classe 2, qui sont trop nombreuses en milieu urbain et qui présentent moins de diversité entre elles, et, par le fait même, une vulnérabilité accrue lorsque plantées ensemble. Cependant, il s'agit d'une grande classe comprenant de nombreuses espèces, et encore un bon potentiel de diversification à l'interne. L'objectif n'est pas d'en cesser l'utilisation, mais d'en diminuer la proportion.

L'approche par groupes fonctionnels vise à donner des choix permettant de rencontrer à la fois les contraintes inévitables de disponibilité, d'acceptabilité, et de conditions spécifiques locales, tout en atteignant les objectifs de diversité fixés.

6- Opter pour des mélanges esthétiquement intéressants pour les citoyens et qui s'inspirent des peuplements forestiers par l'utilisation d'une espèce dominante, d'une codominante et d'espèces compagnes choisies parmi des groupes fonctionnels différents.

⁷ <http://www.arbresurbains.uqam.ca/>

En appliquant l'approche fonctionnelle, le gestionnaire doit aussi tenir compte de critères esthétiques et opérationnels. Pour cela, les groupes fonctionnels sont encore ici très utiles. Par exemple, sur un tronçon de rue donné, pour éviter les monocultures tout en obtenant un résultat intéressant pour le public, des règles simples peuvent être appliquées, telles que de jumeler une espèce dominante avec une codominante, et idéalement une ou des espèces compagnes. Cela rend le tout à l'image d'un peuplement forestier, à la condition que ces espèces soient choisies dans des groupes fonctionnels différents et permettant l'atteinte des objectifs de diversité fixés. Certains guides présentent d'ailleurs des listes d'espèces esthétiquement compatibles (Bassuk et al. 2002).

De plus, les recommandations prennent en compte la pression imposée aux gestionnaires d'augmenter la couverture de canopée. Si la canopée est augmentée sans porter attention, cela pourrait se faire au détriment de la diversité (si par exemple seulement quelques espèces à grand déploiement sont favorisées). Ainsi, il ne faut pas croire que la diversification est plus importante que la couverture de canopée. Il est suggéré d'unir ces deux idées pour créer des communautés inspirantes qui produisent amplement de services écosystémiques sur le long terme tout en étant résilientes. Au contraire, la diversité est au service du maintien de la canopée.

7- Dans les emplacements plus favorables, porter une attention particulière à intégrer des espèces des groupes moins bien représentés en général. De plus, les emplacements favorables devraient être élargis dans les quartiers les plus urbanisés.

Certains des groupes fonctionnels proposés pour augmenter la diversité sont en partie composés d'espèces potentiellement moins adaptées à l'environnement urbain. À long terme, il est fort probable que de nouveaux cultivars adaptés seront développés. Mais à court terme, il serait intéressant de saisir les occasions disponibles pour planter autre chose que des espèces du groupe déjà trop abondant, et ce particulièrement dans les secteurs plus urbanisés où les types d'emplacements favorables à plusieurs groupes fonctionnels comme les parcs sont moins nombreux. Il serait également intéressant de favoriser la création d'aménagements présentant des conditions favorables à un plus grand nombre d'espèces et de groupes fonctionnels.

Il est normal que la diversité, quelle que soit l'approche utilisée ou le taxon visé, soit plus faible en rue qu'en parc puisque la gamme d'espèces capables de tolérer les stress en bordure de rue est plus limitée. Selon le principe du « bon arbre au bon endroit », le premier filtre à appliquer lors de l'élaboration d'une liste d'espèces potentielles à planter à proximité du réseau routier doit être celui de la tolérance aux conditions de vie qui y règnent, qui peuvent par ailleurs être plus ou moins contraignantes selon la rue. C'est à partir de cette liste qu'il faudrait tenter de diversifier les alignements d'arbres de rue. Dans un contexte où les conditions de vie sont moins contraignantes, il y a beaucoup plus de latitude pour diversifier les plantations et utiliser des groupes fonctionnels peu représentés. On peut aussi se permettre des essais d'espèces qui sont à la limite de leur aire de répartition ou qui sont peu abondantes. Dans ces conditions plus favorables, on devrait limiter le plus possible le recours aux espèces bien adaptées en rue.

Ceci étant dit, il faut aussi impérativement travailler à élargir cette liste d'espèces acceptées en rue. Le gestionnaire a souvent tendance à planter ce qu'il connaît, ou ce qui lui a été recommandé, négligeant un grand nombre d'espèces parmi lesquelles nous pensons – suite à la lecture des données et rapports - qu'il y a de bonnes candidates qui mériteraient d'être testées et développées.

8- Planifier un plus grand recours aux conifères dans les endroits plus favorables.

Les conifères présentant des caractéristiques et sensibilités particulières, il faudra pour y arriver en intégrer là où cela est possible. En général, les conifères (Classe 1) sont faiblement représentés dans les milieux urbains, alors qu'ils le sont souvent 2x plus dans les forêts naturelles à l'extérieur de la grande région de Montréal. En milieu urbain, il n'est pas inhabituel d'observer des endroits qui en sont presque totalement dépourvus. Les conifères sont pourtant connus pour apporter beaucoup en termes de diversité d'habitats (oiseaux, insectes) et de fonctions. En plus d'être peu nombreux, les conifères se trouvent souvent en marge de la trame urbaine, dans les parcs. Il est possible de mettre en place des incitatifs pour augmenter le nombre de conifères en parcs, sur les grands îlots de voirie, les parterres d'édifices municipaux ou autres, les bandes gazonnées le long de murs aveugles, ou auprès des citoyens lors de distribution d'arbres pour ceux qui ont de grandes cours et de grands parterres.

9- Lors de la sélection d'espèces, accorder une plus grande importance à la tolérance à la sécheresse des espèces, surtout dans les emplacements plus sensibles.

Il est important de noter que la recommandation 9 ne devrait pas complètement nier la recommandation générale d'augmentation de la diversité à travers tous les groupes. Par contre, le Regroupement des CRE du Québec et le Consortium Ouranos prévoient pour la région de Montréal que « les changements climatiques seront très probablement responsables d'une hausse de la fréquence et de la durée des vagues de chaleur estivales » (Logan 2016, RNCREQ et Ouranos 2014). Ce phénomène sera plus accentué en milieu urbain, étant donné la minéralisation et les grandes surfaces absorbant la chaleur tels les toits et les stationnements; c.-à-d. les « îlots de chaleur ».

Ce phénomène a un impact prévisible sur la santé humaine, mais aussi sur les arbres, ce qui entraîne une rétroaction qui aggravera l'effet sur les personnes, à moins que des mesures ne soient prises pour diminuer le risque pour les arbres. Comme il a été mentionné, il est possible de diminuer ce risque simplement par effet de dilution, en augmentant la diversité des espèces utilisées. Cependant, il faudra aller plus loin, et accorder une plus grande importance à la tolérance à la sécheresse des espèces, surtout dans les emplacements plus sensibles. Il ne faut pas tomber dans le piège de réduire fortement la liste d'espèces plantées puisque la nature des risques à venir comporte beaucoup d'incertitudes.

Ainsi, l'approche fonctionnelle sera encore ici d'une aide précieuse. Les groupes les plus sensibles aux stress hydriques, sont en moyenne les 1A (épinettes, sapins), la Classe 2 au complet (érables, frênes, tilleuls, ...) et surtout le 5 (peupliers) (Tableau 1), révélant encore un risque supplémentaire lié à la surutilisation de la Classe 2. En moyenne, les espèces les plus

tolérantes à la sécheresse sont retrouvées dans les groupes de la Classe 4 (chênes, légumineuses), et le groupe 1B (pins).

10- Dans les secteurs industriels ou commerciaux avec présence d'îlots de chaleur et une faible canopée, porter une attention particulière à augmenter non seulement la canopée, mais surtout la résilience face à l'augmentation probable des températures et des stress.

La santé des travailleurs et des résidents de ces secteurs est davantage liée à la qualité des plantations qu'ailleurs, et il faudra profiter de chaque emplacement plus propice pour tenter d'augmenter la diversité.

4.0 L'outil – Interprétation des calculs de diversité

Un outil simplifié permettant le calcul et l'interprétation de la diversité fonctionnelle a été distribué lors de la formation, ainsi qu'un document concernant son mode d'emploi. Consultez ce document pour toutes questions liées à l'usage de l'outil. Le court texte qui suit sert à présenter quelques considérations pour l'interprétation des calculs.

En se rappelant des concepts présentés au début de ce guide, il faut savoir que la diversité est maximisée lorsqu'un plus grand nombre « d'unités » (espèces, groupes, etc.) sont présentes dans un système de façon équitable. Comme il y a 10 groupes fonctionnels, une diversité fonctionnelle « parfaite » décrira une communauté dont les 10 groupes sont présents à 10 % du total chacun. Selon l'outil, cela se traduira par une valeur calculée (le nombre effectif de groupe fonctionnel) de 10. Par contre, une diversité parfaite est souvent impossible. Il faut donc utiliser des classements selon le nombre effectif de groupe (NEG) :

- Diversité très faible = NEG de 0 à 2.99
- Diversité faible = NEG de 3 à 4.99
- Diversité moyenne = NEG de 5 à 6.99
- Diversité élevée = NEG de 7 à 8.99
- Diversité très élevée = NEG de 9 à 10

Ainsi, un NEG de 7 et plus devrait être visé en créant les plans de plantation. Il est tout de même important de noter qu'il est faut aussi considérer les classes fonctionnelles en interprétant les résultats. Considérons l'exemple au Tableau 3 d'une population de 35 arbres qui ont tous un NEG autour de 7.

La communauté 1 est distribuée de façon équitable mais manque non seulement de groupes, mais aussi de classes entières. La communauté 2 présente des groupes codominants et des groupes compagnes, et toutes les classes sont représentées. Par contre, la dominance est encore prononcée dans un seul groupe. La communauté 3 distribue mieux la dominance entre les différentes classes sans nuire au principe de l'équité. Bien que toutes ces communautés présentent un NEG similaire, leur résilience et production de service ne le seront pas. La communauté 3 est largement supérieure à la communauté 1 et aussi meilleure que la communauté 2 (qui est elle-même meilleure que la communauté 1). Ainsi, il est également

important de tenir compte des principes de l'approche en interprétant la « résilience observée » des résultats des calculs.

Tableau 3. Présentation de trois communautés d'arbres avec une population de 35 et un NEG autour de 7 pour comparaison

Groupe Fonctionnelle	Communauté 1	Communauté 2	Communauté 3
1A	5	2	2
1B	5	1	8
2A	5	8	2
2B	5	8	1
2C	5	8	2
3A	5	0	8
3B	5	2	1
4A	0	2	1
4B	0	2	8
5	0	2	2
NEG	7	6.9	7.2

5.0 Références

- Ackerly DD, Cornwell WK. 2007. A trait-based approach to community assembly: partitioning of species trait values into within-and among-community components. *Ecology Letters* 10: 135-45.
- Bassuk NL, Trowbridge P, Grohs C. 2002. Visual similarity and biological diversity: street tree selection and design. Paper presented at the European Conference of the International Society of Arboriculture, Oslo.
- Chave J, Coomes D, Jansen S, Lewis SL, Swenson NG, Zanne AE. 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters* 12: 351-66.
- Comas LH, Eissenstat DM. 2009. Patterns in root trait variation among 25 co-existing North American forest species. *New Phytologist* 182: 919–28.
- Díaz S, Hodgson JG, Thompson K, Cabido M, Cornelissen JHC, Jalili A, Montserrat-Martí G, Grime JP, Zarrinkamar F, Asri Y, Band SRB, S., Castro-Díez P, Funes G, Hamzehee B, Khoshnevi M, Pérez-Harguindeguy N, Pérez-Rontomé MC, Shirvany FA, Vendramini F, Yazdani SA-A, R., Bogaard A, Boustani S, Charles M, Dehghan M, de Torres-Espuny L, Falczuk V, Guerrero-Campo J, Hynd A, Jones G, Kowsary E, Kazemi-Saeed F, Maestro-Martínez M, Romo-Díez A, Shaw S, Siavash B, Villar-Salvador P, Zak MR. 2004. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science* 15: 295-304.
- Hempel S, Götzenberger L, Kühn I, Michalski SG, Rillig MC, Zobel M, Moora M. 2013. Mycorrhizas in the Central European flora: relationships with plant life history traits and ecology. *Ecology* 94: 1389-99.
- Jost L. 2006. Entropy and diversity. *Oikos* 113: 363-75.
- Kendal D, Dobbs C, Lohr VI. 2014. Global patterns of diversity in the urban forest: Is there evidence to support the 10/20/30 rule? *Urban Forestry & Urban Greening* 13: 411-7.
- Laliberté E, Legendre P. 2010. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology* 91: 299-305.

- Laliberté E, Shipley B. 2011. FD: measuring functional diversity from multiple traits, and other tools for functional ecology. R package version 1.0-11.
- Logan T. 2016. Portrait des changements climatiques pour les zones urbaines du Québec. Ouranos, Montréal.
- MacArthur RH, Wilson EO. 1967. Theory of Island Biogeography. Princeton University Press.
- Mason NWH, Mouillot D, Lee WG, Wilson JB. 2005. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. *Oikos* 111: 112-8.
- Niinemets Ü, Valladares F. 2006. Tolerance to shade, drought and waterlogging of temperate, northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs* 76: 521-47.
- Nock CA, Paquette A, Follett M, Nowak DJ, Messier C. 2013. Effects of urbanization on tree species functional diversity in eastern North America. *Ecosystems* 16: 1487-97.
- Paquette A, Messier C. 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Global Ecology & Biogeography* 20: 170-80.
- Paquette A, Joly S, Messier C. 2015. Explaining forest productivity using tree functional traits and phylogenetic information: two sides of the same coin over evolutionary scale? *Ecology and Evolution* 5: 1774–83.
- R Core Team. 2015. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reich PB. 2014. The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology* 102: 275-301.
- RNCREQ, Ouranos. 2014. Faire face aux changements climatiques - Brochures régionales - www.rncreq.org/projets/adaptation.html.
- Ruiz-Benito P, Gómez-Aparicio L, Paquette A, Messier C, Kattge J, Zavala MA. 2014. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests. *Global Ecology & Biogeography* 23: 311–22.
- Santamour FSJ. 1990. Trees for urban planting: Diversity, uniformity, and common sense.
- Tobner CM, Paquette A, Reich PB, Gravel D, Messier C. 2014. Advancing biodiversity – ecosystem functioning science with the use of high-density tree-based experiments. *Oecologia* 174: 609-21.
- Wright IJ, Reich PB, Westoby M, Ackerly DD, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen JHC, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom PK, Gulias J, Hikosaka K, Lamont BB, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley JJ, Navas M-L, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov VI, Roumet C, Thomas SC, Tjoelker MG, Veneklaas EJ, Villar R. 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* 428: 821-7.