

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFET DES CONDITIONS DE CROISSANCE URBAINES ET DU CLIMAT SUR LES TRAITS DE VAISSEAUX
DE XYLÈME DES ARBRES

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR
DAVIA YAHIA

FÉVRIER 2026

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur Alain Paquette pour ses précieux conseils, sa disponibilité, sa bienveillance et sa confiance. Je te remercie de m'avoir accueilli dans un laboratoire où l'entraide est au cœur du succès. Je remercie également mon co-directeur Dan Kneeshaw de m'avoir guidé dans la réalisation de ce projet, de ses réflexions stimulantes et pour les conversations enrichissantes. Un immense merci à ma co-directrice Kaisa Rissanen, pour sa guidance, sa rigueur et d'avoir partagé son expertise en dendroanatomie et en physiologie, et de m'avoir aidé à résoudre de nombreux problèmes ce qui a permis d'améliorer ce projet.

Merci aux villes participantes de Montréal, Halifax, Québec, Edmonton et Winnipeg, et aux personnes affiliées qui nous ont permis de carotter des arbres en ville. Merci aux personnes qui ont contribué au carottage, soit Greg King, Lauren Perras, France Conciatori, Jacques Tardif, Meggy Legault, Isabella Boushey et Valentina Vitali.

Je remercie également le Centre d'étude de la forêt pour l'accès à du matériel et outils essentiels, et à Samuel Bouchut de m'avoir gentiment montré comment utiliser WinCELL.

Merci à Arno, Joannie, Dominique, Ariane et Ambre qui ont contribué à la coupe et à la coloration des échantillons de bois, sans qui je serais probablement encore dans le laboratoire du CEF en train de trancher des morceaux de bois. Merci aux membres du PaqLab avec qui j'ai partagé ces deux dernières années, Sarah, Mégane, Charlotte, Vanessa, Johanna, Ambre, David, Jérémy et Laura. Merci pour votre aide et bienveillance, pour les maintes discussions et moments de rire. Merci à Mégane et Geoffrey Zanin pour l'aide en statistiques.

Enfin, je tiens à remercier mon entourage de leur amour inconditionnel et de leur support. Merci à mes parents de m'avoir transmis leur curiosité pour le monde qui nous entoure et leur amour de la nature. Merci à mes frères et sœurs, à mes ami.e.s de leur support et encouragement. Merci à mon copain Vincent d'avoir été là pour moi, merci de ta patience et de ton écoute.

Merci à vous tous qui m'avez soutenue, aidée et encouragée et qui avez rendu cette expérience enrichissante et mémorable.

DÉCLARATION DES CONTRIBUTIONS

Ce projet s'inscrit dans un ensemble d'études menés par Alain Paquette et Dan Kneeshaw sur l'adaptation des forêts canadiennes aux changements climatiques. L'idée initiale de ce projet d'anatomie du bois vient donc de Alain Paquette, Dan Kneeshaw, et de Kaisa Rissanen qui a également mené une étude sur les vaisseaux du *Celtis occidentalis* à Montréal, permettant de mettre en place la méthodologie pour ce projet-ci. Les carottes, et de ce fait la sélection des sites et arbres, proviennent d'un projet complémentaire à celui-ci de K. Rissanen et Valentina Vitali. Elles ont mené un projet de sur la croissance des arbres urbains, me permettant ainsi de réutiliser les carottes prélevées pour en analyser les vaisseaux de xylème. Ce mémoire est le fruit d'une collaboration, ayant été rédigé par moi-même, et révisé par Kaisa Rissanen, Dan Kneeshaw et Alain Paquette.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	II
DÉCLARATION DES CONTRIBUTIONS	III
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
RÉSUMÉ	8
CHAPITRE I	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE	9
1.0 PROBLÉMATIQUE.....	9
1.2 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	11
1.2.2 FORMATION ET RÔLE DU XYLÈME.....	11
<i>Structure cellulaire du xylème</i>	11
<i>Types de bois et organisation des vaisseaux</i>	12
<i>Transport de l'eau et efficacité hydraulique</i>	13
<i>Cavitation et résistance</i>	13
<i>Stratégies de réponse à la sécheresse</i>	14
<i>Acclimatation et plasticité phénotypique</i>	15
1.2.3 CONDITIONS DE CROISSANCE EN MILIEU URBAIN	16
<i>Température de l'air et demande en évapotranspiration</i>	17
<i>Contraintes hydriques et disponibilité en eau des différentes zones en ville</i>	18
1.2.4 LE XYLÈME EN MILIEU URBAIN.....	20
1.3 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	21
CHAPITRE II	24
2.1 INTRODUCTION	25
2.2 MATERIALS AND METHODS.....	27
2.2.1 STUDY AREA.....	27
2.2.2 TREE SPECIES AND TREE SELECTION	29
2.2.3 TREE CORE PREPARATION AND ANATOMICAL MEASUREMENTS	29
<i>Diffuse-porous species: Micro procedure</i>	30
<i>Ring-porous species: Stereo procedure</i>	30
2.2.4 DATA EXTRACTION.....	30
2.2.5 STATISTICAL ANALYSES	31
2.3 RESULTS.....	32
2.3.1 VESSEL DIAMETER.....	32
2.3.2 VESSEL FREQUENCY.....	33
2.3.3 HYDRAULIC CONDUCTIVITY	34
2.3.4 CLIMATE EFFECT ON VESSEL TRAITS	34
2.3.5 MODEL PERFORMANCE.....	35
2.3.6 PEARSON'S CORRELATION COEFFICIENTS BETWEEN VESSEL DIAMETER AND VESSEL FREQUENCY	41
2.4 DISCUSSION.....	43
2.5 CONCLUSION	46
CONCLUSION GÉNÉRALE	48
ANNEXE A.	50

ANNEXE B.	53
RÉFÉRENCES.....	56

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 a) Map of the studied canadian cities.. b) Mean growing season climate of the study cities.	28
Figure 2.2 Predicted mean vessel diameter.....	37
Figure 2.3 Predicted mean vessel frequency.	38
Figure 2.4 Predicted xylem specific hydraulic conductivity..	39
Figure 2.5 Climate effects on vessel traits.	40
Figure A1 Tree height (m) across species, site types and cities	50
Figure A2 Example of sampled site types.....	51
Figure A3 Example of images used for vessel measurements.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Table 2.1 Latitude, longitude, population density and mean growing season climate of the study cities.....	28
Table 2.2 Distribution of sampled trees across species (and xylem type), cities and sites.....	29
Table 2.3 Vessel traits description and measurement method	31
Table 2.4 Results from linear mixed model analysis on mean vessel diameter, vessel frequency and theoretical hydraulic conductivity with the effect of site type (street or park), city, and their interaction, and climate. s.....	36
Table A1 Sampling year per species, city and site type.	52
Table A2 Model structure for each species and trait.....	52
Table B1 Tukey's pairwise tests from linear mixed-effect models analyzing the effect of site type on vessel diameter(VD), vessel frequency(VF) and theoretical hydraulic conductivity (Kh).....	53
Table B2 Tukey's pairwise tests from linear mixed-effect models analyzing the effect of city on vessel diameter(VD) and vessel frequency (VF) within each site type.	54

RÉSUMÉ

Les arbres urbains jouent un rôle essentiel dans le maintien de villes confortables. Cependant, les bénéfices engendrés par les arbres, dépendent de la vigueur des arbres, qui peut être affectée par ces contraintes mêmes que les arbres sont censés atténuer, comme des températures élevées. L'environnement urbain se caractérise par une forte hétérogénéité des conditions de croissance, qui peut varier sur de très courtes distances en raison notamment de l'imperméabilisation du sol. Afin de comprendre comment les arbres s'ajustent et maintiennent leur transport hydraulique parmi ces diverses conditions, cette étude compare les traits des vaisseaux du xylème liés à la sécurité et à l'efficacité hydraulique (diamètre et fréquence) de plusieurs espèces d'arbres urbains communes, dans deux types de sites de croissance: rues et parcs. Les arbres ont été sélectionnés dans cinq villes canadiennes, le long d'un gradient climatique, afin de déterminer si l'effet du type de site sur l'anatomie des vaisseaux est également influencé par le climat. Étant donné que les arbres de rue seraient soumis un stress hydrique plus important, nous nous attendions à ce qu'ils présentent des traits reflétant une sécurité hydraulique accrue, tels que des vaisseaux plus étroits et plus nombreux que ceux des arbres de parc. Nos résultats montrent toutefois que le type de site (rue ou parc) n'exerce pas d'effet systématique sur les traits des vaisseaux. La magnitude et la direction des réponses apparaissent spécifiques à chaque espèce et peuvent varier selon les conditions climatiques.

Mots clés: xylème, stress hydrique, arbres urbains, sécurité hydraulique

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.0 Problématique

En 2021, près des trois quarts de la population canadienne vivaient dans l'un des principaux centres urbains du pays, la population en ville étant en constante augmentation (Statistiques Canada, 2022). La croissance démographique des villes augmente la demande en infrastructures et modifie les surfaces terrestres par l'imperméabilisation des surfaces et la réduction de la couverture végétale. Ceci contribue à une augmentation des températures de l'air et de surface, phénomène connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain (ICU) (Morris et al., 2017; Oke, 2002, Tam et al., 2015). Les vagues de chaleur, projetées comme étant de plus en plus fréquentes au Canada (Bush & Lemmen, 2019) compromettent d'autant plus le confort thermique des citoyens (Gamble, 2012; Morris et al., 2017).

Les arbres urbains jouent un rôle essentiel dans la mitigation des ICU et l'amélioration du confort thermique grâce à leur capacité de refroidissement par la création d'ombre et par leur transpiration (Gillerot et al., 2024; Han et al., 2024; Rahman et al., 2019; Ren et al., 2022). Les arbres de ville améliorent également le bien-être psychologique des habitants (Elsadek et al., 2019). Toutefois, la réalisation de tels bénéfices dépend de la vitalité des arbres qui peut elle-même être affectée par les contraintes qu'ils sont sensés atténuer (Haase et al., 2014; Mullaney et al., 2015). Par exemple, des températures de l'air accrues augmentent le déficit de pression de vapeur dans l'air, favorisant une perte d'eau chez les arbres et conséquemment un stress hydrique (Peters et al., 2010).

Les villes sont des environnements hétérogènes exposant les arbres à des conditions assez diverses. La température de l'air peut varier grandement au sein d'une même ville, de manière comparable aux différences de températures entre un centre-ville et une zone rurale adjacente. Les températures diurnes augmentent linéairement avec la proportion de surfaces imperméabilisées (Ziter et al., 2019). De plus ces surfaces, comme le béton ou l'asphalte, limitent l'infiltration de l'eau de pluie, réchauffent le sol et restreignent le développement racinaire, contribuant à créer des conditions arides (Armson et al., 2013; Celestian & Martin, 2004; Fini et al., 2022; Graves & Dana, 1987; Sæbø et al., 2003; Yang & Zhang, 2011). Dans les climats froids, le stress hydrique peut aussi être aggravé par le sel de déglacage qui se disperse à

partir des routes et trottoirs (Lundmark & Olofsson, 2007). Ce sel modifie la chimie du sol, réduisant la croissance racinaire et l'absorption d'eau par les racines (Equiza et al., 2017; Hofman et al., 2012; Kamaluddin & Zwiazek, 2004; Tang et al., 1993). Les arbres plantés le long des rues sont donc particulièrement exposés à ces conditions, ce qui se traduirait par une vitalité et une croissance réduite (Kostic et al., 2019; Nillson et al., 2001; Sand et al., 2018). Des emplacements comme les espaces verts et parcs¹ semblent offrir des conditions de croissance plutôt favorables pour les arbres, considérant les températures ambiantes plus fraîches et plus stables (Upmanis et al., 1998; Watkins et al., 2002; Yan et al., 2018) et une meilleure rétention d'eau dans le sol (Nielsen et al., 2007). Néanmoins, les parcs ne sont pas toujours ces oasis idéals que l'on imagine. Leurs parterres sont utilisés par des milliers de marcheurs et petits véhicules, compactant le sol (Millward et al., 2011). De plus, contrairement aux apparences, ils ont souvent été établi par-dessus des sites très perturbés, tels que des dépotoirs, dépôts à neige et carrières, avec seule une mince couche de sol comme amendement (communication, Ville de Montréal; Richmond et al., 2025).

Étant donné ces multiples contraintes, il est essentiel de mieux comprendre comment les arbres s'ajustent à la diversité de conditions de croissances urbaines. Certaines espèces semblent s'y acclimater, puisque leur croissance est maintenue même dans les sites les plus imperméabilisés (Fini et al., 2022; Rissanen-Vitali et al., in prep). La plasticité de traits fonctionnels constitue un des mécanismes d'évitement de la sécheresse. Parmi ceux-ci, on observe une réduction de la surface foliaire, pour limiter la perte en eau par transpiration, la perte précoce des feuilles en période de sécheresse et des changements dans la structure racinaire pour mieux absorber l'eau (Gouveia & Freitas, 2009; McLean et al., 2014; Olsen et al., 2013). Au niveau du bois, des modifications au niveau de l'anatomie des vaisseaux de xylème contribuent à une meilleure tolérance à la sécheresse (Alon et al., 2024; Fontes et al., 2022; García-Cervigón et al., 2020).

L'étude de ces traits est donc fondamentale pour mieux comprendre les mécanismes qui assurent une croissance saine, qui confèrent aux arbres une tolérance des milieux urbains et assurent une provision de services. En effet, l'efficacité du transport de l'eau est un déterminant majeur des échanges gazeux affectant plusieurs processus comme la transpiration et la photosynthèse (Brodribb & Feild, 2008;

¹ « Parc » réfère ici à une zone aménagée où les arbres poussent dans une matrice majoritairement composée de pelouses tondues. Les parcelles de forêts naturelles (non plantées, dominées par les arbres et plantes autres que le gazon) sont exclues.

Mencuccini et al., 2003). Finalement, l'étude des traits de vaisseaux nous permet de mieux comprendre les conditions mêmes auxquelles font face les arbres.

1.2 État des connaissances

1.2.2 Formation et rôle du xylème

Chez les plantes ligneuses dicotylédones, représentant la majorité de la forêt urbaine, la croissance primaire réfère à l'allongement des racines et des tiges par la division cellulaire des méristèmes apicaux. La croissance secondaire correspond à la formation de tissus vasculaires (phloème et xylème secondaires) par un type de méristème latéral, le cambium, résultant en un épaissement de la tige, des branches et des racines. Le cambium est composé de deux types de cellules méristématiques morphologiquement distinctes: les initiales fusiformes et radiales. Les fusiformes sont orientées longitudinalement par rapport à la tige et se divisent principalement en cellules vasculaires, en fibres et en cellules parenchymateuses. Les initiales radiales sont plutôt de forme isodiamétrique et se divisent en cellules de rayons orientées radialement, qui assurent le transport radial et le stockage (Esau & Evert, 2006; Fromm, 2013).

Le xylème secondaire est produit vers le centre de la tige et le phloème vers l'extérieur. Le xylème est principalement constitué de cellules mortes aux parois secondaires épaisses, riches en cellulose, hémicelluloses et lignine. Ce tissu assure le soutien mécanique de la plante, le stockage d'eau et nutriments, ainsi que le transport de l'eau et des minéraux (sève brute) à partir des racines jusqu'aux feuilles (Pratt & Jacobsen, 2016). Le phloème, quant à lui, transporte les produits de la photosynthèse (sève élaborée) et des molécules de signalisation, notamment les phytohormones et certains peptides, des organes sources vers les organes puits (Esau & Evert, 2006; Gilbert, 2000). Ce projet se concentre sur le xylème secondaire qui est référé par après en tant que « xylème » ou « bois ».

Structure cellulaire du xylème

L'évolution d'un système vasculaire chez les plantes a permis leur transition de milieux aquatiques aux milieux terrestres. Notamment, l'apparition des trachéides unicellulaires aux parois épaisses et lignifiées leur a permis de croître plus facilement en hauteur (Bailey, 1953). Par la suite, les vaisseaux multicellulaires sont apparus dans plusieurs clades de façon indépendante (Pitterman, 2010).

La différenciation cellulaire au sein du xylème, séparant les fonctions de transport et de soutien a favorisé le succès et la diversité des Angiospermes. Leur xylème est composé majoritairement de fibres,

parenchyme et vaisseaux. Les fibres sont de longues cellules à parois secondaires lignifiées assurant le support mécanique de la plante. Le parenchyme, axial ou en rayon, sert surtout au stockage de réserves (amidon, lipides, etc.) (Essiamah & Eschrich, 1985; Zimmermann & Brown, 1971).

Les cellules vasculaires, soient les éléments de vaisseau, sont des cellules mortes à maturité. Elles sont de forme allongée, jusqu'à 0,5 mm de diamètre et sont pourvus de parois secondaires lignifiées. Empilés les uns sur les autres, reliés par des plaques de perforations aux extrémités, ils forment des vaisseaux hydrauliques. Ces vaisseaux sont connectés latéralement par des ponctuations dans leurs parois, formant ainsi un réseau hydraulique (Esau & Evert, 2006). Les vaisseaux passent par différentes étapes de développement. Ceux-ci sont généralement plus courts au début de la croissance secondaire, puis s'allongent jusqu'à ce que le bois soit considéré mature (Bailey, 1920; Olson et al., 2021). Des observations proposent également l'augmentation de l'âge du cambium est associé à une production de vaisseaux plus larges (Jacobsen et al. 2018, Rodriguez-Zaccaro et al. 2019). Toutefois, de récentes études suggèrent que cet élargissement plutôt déterminé par longueur du trajet hydraulique se rendant aux feuilles (Bicego et al., 2025).

Types de bois et organisation des vaisseaux

Chez les Angiospermes, deux extrêmes dans l'organisation des cernes de croissance sont reconnus: pores diffus et zones poreuses. Cette classification repose sur les caractéristiques visuelles de la disposition et taille des vaisseaux en section transversale, mais implique aussi des différences fonctionnelles. Une répartition uniforme et une taille homogène des vaisseaux à travers les cernes de croissance caractérisent les bois à pores diffus, alors que des vaisseaux distinctivement plus grands dans le bois de printemps, passant au bois d'automne dans les mêmes cernes caractérisent les bois à zones poreuses annulaires. Un type intermédiaire entre ces deux formes est désignée comme semi-annulaire ou semi-diffus (Esau & Evert, 2006).

Les arbres à pores diffus utilisent les vaisseaux de plusieurs cernes pour le transport de l'eau au cours d'une même saison de croissance (Kozłowski & Winget, 1963; Suzuki et al., 1996). Les arbres à zones poreuses fonctionnent habituellement sur un seul cerne, ou peu, leur cerne annuel le plus en périphérie étant responsable de plus de 90% de la conductivité hydraulique (Ellmore & Ewers, 1985; Kozłowski & Winget, 1963). Ceux-ci dépendent alors de la formation de nouveaux vaisseaux au printemps pour rétablir la circulation de l'eau (Hacke & Sauter, 1996).

Transport de l'eau et efficacité hydraulique

Une des fonctions principales du xylème est de fournir une voie de transport pour l'eau au sein du continuum sol-plante-atmosphère. Cette circulation d'eau à travers les vaisseaux est expliquée par la théorie de la cohésion-tension qui postule que la cohésion entre les molécules d'eau, leur adhésion aux parois des vaisseaux et une force de tension permettent le mouvement de l'eau (Dixon, 1914; Tyree & Zimmermann 2002). Un gradient de différence de potentiel hydrique entre les racines et les feuilles tire l'eau vers le haut, régulé par l'ouverture et la fermeture des stomates qui permettent la transpiration d'eau. Ce gradient est fortement influencé par le déficit de pression de vapeur, défini comme la différence entre la quantité d'humidité dans l'atmosphère par rapport à la quantité d'humidité que l'atmosphère ambiante peut contenir lorsque celui-ci en est saturé.

Le mouvement de l'eau dans les vaisseaux de xylème est généralement estimée en suivant la loi de Hagen-Poiseuille, selon laquelle le volume de fluide circulant dans un tube cylindrique est proportionnel à la puissance quatre de son rayon (Nobel, 1999; Zimmermann, 1983). Ainsi, l'efficacité du transport de l'eau dépend du diamètre de vaisseaux, une faible augmentation en diamètre augmentant considérablement son efficacité.

Pour assurer un transport de l'eau adéquat, les vaisseaux doivent s'ajuster à des contraintes internes et externes. Lors de la croissance apicale de l'arbre, la distance parcourue par les vaisseaux augmente, augmentant la résistance hydraulique due à la friction, si le diamètre de vaisseau reste le même (Ryan & Yoder, 1997). Le rétrécissement des vaisseaux de la base du tronc jusqu'à l'apex permet de minimiser les effets de la hauteur de l'arbre sur la résistance hydraulique (Becker et al., 2000; Enquist, 2002). Ainsi, l'anatomie des vaisseaux produits change avec la maturation et la croissance de l'arbre (Rodriguez-Zaccaro et al., 2019). Le diamètre de vaisseau augmente de façon marquée lors des premiers mètres de croissance en hauteur de la tige jusqu'à l'atteinte d'un semi-plateau (Olson et al., 2021).

Cavitation et résistance

Étant donné que le bois assure différentes fonctions, une forte demande pour l'une d'entre elles peut se faire au détriment d'une autre, ces demandes changeant selon les conditions environnementales. Ces multiples besoins mènent donc à des compromis fonctionnels, comme un compromis entre efficacité et sécurité du transport de l'eau face à la cavitation.

La cavitation correspond ici à un phénomène pendant lequel la pression de l'eau devient inférieure à sa pression de vapeur, formant des bulles qui rendent les vaisseaux affectés embolisés et incapables circuler l'eau (Tyree et al., 1994). L'embolie réfère alors ici à l'état d'un vaisseau rendu incapable de transporter l'eau à cause de la présence de bulles de vapeur ou d'air formées lors d'un évènement de cavitation. Un tel évènement peut se produire lors des cycles de gel-dégel, par des dommages mécaniques ou bien lorsque la demande atmosphérique en eau est accrue en combinaison avec une pauvre disponibilité en eau du sol (Tyree & Sperry, 1989; Tyree & Zimmerman, 2002). L'embolie peut débuter au niveau d'un seul vaisseau (Johnson et al., 2020) et se propager aux vaisseaux adjacents par germe d'air via les punctuations (Brodersen et al., 2013), dont les traits tels que l'épaisseur et la porosité de leurs membranes jouent un rôle dans la résistance à l'embolie (Jansen et al., 2009; Plavcová et al., 2011). Les vaisseaux de grand diamètre, étant plus efficaces, sont souvent associés à une plus grande vulnérabilité à la cavitation (Hacke et al., 2006; Lemaire et al., 2021), bien que le diamètre de vaisseau ne représente pas le seul déterminant de cette vulnérabilité. D'autant plus, ce compromis entre efficacité et sécurité hydraulique serait en fait relativement faible, considérant que plusieurs espèces présentent à la fois une pauvre efficacité et une pauvre sécurité, suggérant que ces traits peuvent varier de façon indépendante (Gleason et al., 2016).

La cavitation limite le transport de l'eau jusqu'à ce que de nouveaux vaisseaux soient formés ou bien que ceux étant embolisés se remplissent (Hacke & Sperry, 2001). Lorsqu'une proportion trop importante de vaisseaux est embolisée, entraînant la dessiccation des tissus de la plante, soit autour de 88% de perte de conductivité, la plante ne serait plus capable de récupérer (Urli et al., 2013).

Stratégies de réponse à la sécheresse

Face à la sécheresse, diverses stratégies hydriques peuvent limiter la perte d'eau et réduire la vulnérabilité à la cavitation. À court terme, la régulation des stomates est le principal mécanisme par lequel les plantes limitent les pertes d'eau via l'évapotranspiration. Certaines espèces catégorisées comme étant isohydriques ferment leurs stomates, réduisant la perte d'eau via l'évapotranspiration (Tng et al., 2018), mais réduisant de même le taux photosynthétique et limitant leur croissance (Alon et al., 2024). Les espèces dites anisohydriques maintiennent leurs stomates ouverts au risque d'une vulnérabilité accrue à l'embolie. Ces espèces, comme *Quercus* spp, auraient toutefois tendance à hâter la perte d'une partie plus ou moins importante des feuilles bien avant l'automne pour limiter la perte d'eau (Sperlich et al., 2019; Wolfe et al., 2016).

Ces stratégies entraînent une perte conséquente de capacité photosynthétique, réduisant la production de glucides et risque de conduire à une famine en carbone. Suite à un épisode de sécheresse, il a été observé que les arbres qui n'avaient pas reconstitué plus de 50 % de leur couvert foliaire montraient des niveaux critiques de réserves, et plusieurs sont morts dans les années suivantes (Galiano et al., 2011). Ces stratégies semblent efficaces pour les sécheresses de courte durée, mais la capacité de maintenir des vaisseaux fonctionnels sous des conditions de sécheresse extrême et ou prolongée, c'est-à-dire l'ajustement de la vulnérabilité à la cavitation est alors un facteur clé dans la survie des individus.

Acclimatation et plasticité phénotypique

Les arbres peuvent s'adapter et/ou s'acclimater en fonction de la disponibilité en eau du sol, par une modification de leur vulnérabilité à la cavitation sur le long terme. L'adaptation est réalisée par sélection naturelle progressive de génotypes présentant une meilleure aptitude dans des habitats plus xériques. L'acclimatation est une réponse phénotypique à une variation du régime hydrique, par laquelle chaque arbre modifie son phénotype au cours de sa vie.

Cette acclimatation repose sur des ajustements anatomiques ou physiologiques et permet aux arbres d'optimiser le compromis entre efficacité hydraulique et résistance à l'embolie selon les conditions hydriques locales, e.g. la surface foliaire spécifique, l'épaisseur de feuille, la densité et taille des stomates (Gouvêla et Freitas, 2009; Olsen et al., 2013; McLean et al., 2014), et finalement le diamètre et la densité de vaisseaux du xylème (Alon et al., 2024; Fontes et al., 2022; García-Cervigón et al., 2020). La largeur des vaisseaux peut être réduite pour diminuer le risque d'embolie, et l'abondance des vaisseaux peut être accrue pour offrir une plus grande redondance hydraulique. Ainsi, même si une fraction du réseau est embolisée, d'autres conduits restent fonctionnels et assurent le maintien du transport de l'eau. Cette plasticité est illustrée par des expériences en jardin commun qui ont montré des différences dans les traits des vaisseaux entre arbres d'une même population plantés sous des conditions climatiques différentes, suggérant que la variation observée entre sites en environnement naturel ne résulte pas uniquement d'adaptations au niveau de la population (Fisher et al., 2007; Schreiber et al., 2015).

Ces réponses phénotypiques sont en partie modulées par le climat qui contribue à réguler l'activité cambiale. En climat tempéré, le cambium vasculaire suit des cycles d'activité et de dormance (Catesson, 1994). La croissance radiale démarre lorsque la température ambiante dépasse un certain seuil (Begum et al., 2013; Rossi et al., 2007; Schmitt et al., 2004), et se poursuit jusqu'au début de l'automne. La durée de

la différenciation cellulaire influence la taille finale des cellules: plus la phase d'élargissement est longue, plus les cellules peuvent croître, jusqu'à l'atteinte d'un plateau et finit par cesser par la lignification des parois. La croissance en taille cellulaire demeure tout de même limitée par des contraintes physiologiques et biomécaniques (Buttò et al., 2019).

En parallèle, la disponibilité en eau module directement l'anatomie des vaisseaux. Chez les espèces à pores diffus, les années sèches sont associées à une réduction du diamètre de vaisseaux et une augmentation de leur densité, alors que les précipitations d'avril et de mai sont fortement et positivement corrélées au diamètre (Campelo et al., 2010; Zimmermann et al., 2021). Pour de nombreuses espèces à zones poreuses, on considère que le climat de la fin de l'hiver et du début du printemps influence la différenciation des vaisseaux du bois de printemps, déterminant leur taille finale (Fonti et al., 2007; Pérez-de-Lis et al., 2016), l'aire moyenne de leur lumen dépendant de conditions fraîches et humides durant cette période (Gonzalez & Eckstein, 2003). La largeur des vaisseaux est également influencée par les précipitations de la saison de croissance précédente (Pérez-de-Lis et al., 2016): l'absence de stress hydrique durant la saison antérieure est associée à une zone de bois de printemps plus épaisse, à des vaisseaux plus larges et à une aire totale de vaisseaux plus importante (Tardif & Conciatori, 2006).

Ainsi, cette modulation du diamètre et de la fréquence des vaisseaux permet aux arbres d'ajuster leur vulnérabilité et de leur conférer une meilleure résilience, ou performance, selon les conditions. En milieu urbain, cette plasticité est particulièrement pertinente. Bien que certains arbres soient des vestiges de forêt, la majorité d'entre eux sont plantés et peuvent donc se retrouver exposés à des conditions différentes de leur environnement initial.

1.2.3 Conditions de croissance en milieu urbain

La ville constitue un environnement assez hétérogène où les arbres sont soumis à des conditions écologiques assez variées, plus ou moins limitantes en eau. D'autant plus, dans un contexte de changement climatique, la fréquence des épisodes de chaleur extrêmes devrait s'accroître, susceptible de provoquer des événements de sécheresses (Bush & Lemmen, 2019), venant exacerber les conditions existantes.

Température de l'air et demande en évapotranspiration

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), étant décrit par des températures plus élevées en ville par rapport aux zones périphériques, particulièrement la nuit, est causé notamment par la conversion des sols naturels en surfaces minérales imperméables. Ce processus altère les dynamiques thermiques et de radiation des surfaces: une absorption accrue du rayonnement solaire lié aux surfaces sombres, une réduction de la perte de chaleur la nuit due aux canyons urbains, des apports de chaleur anthropique due au chauffage et climatisation, circulation routière, une diminution de l'évapotranspiration par la réduction de surfaces végétalisées, etc. (Oke, 1982; Tam et al., 2015). Ces effets contribuent à augmenter la demande atmosphérique en évapotranspiration (Zipper et al., 2017).

Toutefois, les effets d'ICU ne sont pas uniformes. À l'échelle intra-urbaine, une importante hétérogénéité spatiale et temporelle (journalière et saisonnière) en termes de température de l'air et de surface a été observée (Hall et al., 2015; Huang et al., 2011; Jenerette et al., 2016; Shiflett et al., 2017; Ziter et al., 2019). Les rues, couvrant une proportion importante du territoire public, augmentent la température ambiante et de surface par leur capacité à conserver la chaleur. Cette accumulation de chaleur est marquée dans les zones densément bâties, celles-ci étant plus chaudes que des zones d'habitations unifamiliales (Svensson & Eliasson, 2002).

À l'inverse, les espaces verts et parcs exercent un effet de refroidissement (« park cooling effect ») diurne et nocturne pouvant atteindre 3°C sur les zones à proximité et jusqu'à 1 500 m de leur bordure, augmentant avec la taille du parc. Les températures de l'air mesurées en parc sont plus basses mais aussi plus stables qu'en zone environnante (i.e résidentielles et commerciales) (Upmanis et al., 1998; Yan et al., 2018).

Cette hétérogénéité thermique influence directement la demande en évapotranspiration, celle-ci étant fortement corrélée au couvert imperméable. Elle est plus importante au centre-ville, où le couvert non-transpirant est plus important, qu'en parc et espaces verts. La demande en eau est particulièrement marquée au milieu de l'été, période durant laquelle l'humidité du sol est le plus susceptible d'être épuisée (Zipper et al., 2017).

Contraintes hydriques et disponibilité en eau des différentes zones en ville

En ville, l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol peut être ralentie ou inhibée par les surfaces imperméables entourant l'arbre, et l'interception des précipitations par les bâtiments et la cime de l'arbre (Nielsen et al., 2007). Les surfaces imperméables communément utilisées pour aménager les trottoirs et routes, telles l'asphalte et le béton, agissent comme une barrière physique à l'infiltration de l'eau dans le sol (Armson et al., 2013; Fini et al., 2022). Par rapport aux surfaces gazonnées, le ruissellement des eaux de surface sur sol imperméable est de 10 à 20 fois plus important pour une même aire. En zone urbaine, la proportion de ruissellement des eaux de pluie varie entre 30 et 40 % et peut même excéder 50% en zone extrêmement urbanisée, alors que la proportion de ruissellement serait de moins de 5% en zone boisée (Frazer, 2005).

La compaction du sol, nécessaire lors de la pose de surfaces pavées, réduit le volume des larges pores ce qui affecte leur capacité à retenir l'eau (Yang & Zhang, 2011). La compaction des sols est par ailleurs omniprésente en milieu urbain, affectant ainsi les sols de zones imperméabilisés, mais aussi les sols de parc. Dans ces derniers, l'infiltration de l'eau dans le sol peut être assez lente due à l'importante circulation piétonne compactant le sol de même que l'origine du site (e.g. site d'enfouissement, carrière) (Millward et al., 2011; Yang & Zhang, 2011). Les sols de parcs montrent tout de même une meilleure capacité de rétention d'eau comparativement aux sols de rue. De plus, les sols de fosses en rue perdent significativement de l'eau en période estivale, alors que les sols de parc semblent davantage conserver l'eau disponible (Nielsen et al., 2007).

L'accès à l'eau peut être restreint par les conditions physiques du sol qui limitent le développement racinaire. Or, le système racinaire permet de prélever l'eau du sol et d'alimenter le xylème. En ville, l'expansion du système racinaire en profondeur et en largeur peut être limitée par des barrières physiques souterraines tels des conduits, boîtes d'utilité ou autres infrastructures (Jim, 2019). La compaction du sol augmente la résistance à la pénétration des racines (Skinner et al., 2009).

La faible réflectivité et la grande capacité thermique de l'asphalte favorisent l'absorption et la rétention d'importantes quantités de chaleur solaire, élevant ainsi la température de surface et souterraine. Les températures de rhizosphère des arbres poussant sous surfaces pavées sont plus élevées (jusqu'à 16°C) que celles des arbres poussant en terrain gazonnée. Ces températures peuvent, en été, atteindre un seuil critique connu pour causer des lésions racinaires (Celestian & Martin, 2004; Graves & Dana, 1987). Les

arbres poussant sous des sols non pavés peuvent d'ailleurs présenter 105 % de racines de plus que sous des surfaces imperméables (Fini et al., 2022).

Sel de déglacage

L'utilisation de sels de déglacage, principalement le NaCl et marginalement MgCl₂, est courante dans les villes aux climats froids et sa contamination dans les sols est un problème assez connu (Cunningham et al., 2008). Durant l'hiver 2021-2022, plus de 3,5 millions de tonnes de sel ont été utilisées sur les routes canadiennes (excluant le Québec) (Environnement et Changement climatique Canada, 2024). Les pratiques d'application de sel et de gestion de la neige peuvent influencer les conditions du sol localement. Les éclaboussures et la poussière peuvent transporter le sel au-delà des bordures de routes et celui-ci pourrait aussi se déplacer par gouttelettes dans l'air. Celui-ci infiltre le sol à partir des bancs de neige lors de la fonte (Cekstere et al., 2008; Cunningham et al., 2008). Il est estimé que la majorité (90%) du sel dispersé par éclaboussure et par le déneigement se retrouverait à 10 mètres de la route (Lundmark & Olofsson, 2007). Des concentrations importantes de Na⁺ ont tout de même été observées à des dizaines de mètres des surfaces pavées (Cunningham et al., 2008). Des accumulations de Na⁺ et Cl⁻ dans les sols de fosses de trottoir ont été rapportées, mais aussi une importante hétérogénéité par rapport aux quantités accumulées à plusieurs points même le long d'une même rue (Cekstere et al., 2008). Le pH du sol des abords de route entretenues peut atteindre 8,6, ce qui est nettement supérieur à celui des sites non entretenus (Equiza et al., 2017).

L'augmentation du pH et la réduction du potentiel osmotique du sol par l'infiltration de sel est associé à une diminution de la croissance des racines (Hofman et al., 2012; Tang et al., 1993) et une réduction du flux d'eau des racines (Kamaluddin & Zwiazek, 2004).

Sources d'eau inattendues

Malgré les conditions discutées précédemment qui favoriseraient des conditions plus sèches dans des lieux comme les bords de rue, les arbres y poussant pourraient bénéficier de sources d'eau souterraines via des conduits de drainage et d'égouts. La majorité des espèces d'arbres seraient capables d'immiscer leurs racines dans les tuyaux souterrains (Östberg et al., 2012). Les canalisations faites de béton, tant bien que de PVC seraient susceptibles à l'intrusion de racines, notamment au niveau des joints (Östberg et al., 2012; Kuliczowska et al., 2017; Ridgers et al., 2006). Une étude menée à Toronto a montré

un effet important du nombre d'arbres à proximité d'une conduite et de l'âge de celle-ci sur la fréquence de blocages par des racines (Kargar & Joksimovic, 2024).

La majorité des problèmes rencontrés serait dans un rayon de 6 mètres d'un tronc (Randrup, 2000). Il a été rapporté la fréquence d'intrusion serait plus importante chez les espèces pionnières tels des saules, bouleaux, peupliers et ormes (Randrup, 2000), mais une autre étude montre que le risque peut varier considérablement entre espèces d'un même genre, et que des espèces traditionnellement considérées comme à faible risque peuvent parfois causer un nombre important d'intrusions (Östberg et al., 2012).

1.2.4 Le xylème en milieu urbain

En analysant l'effet de l'urbanisation sur les traits de vaisseaux, soit en échantillonnant des arbres dans des forêts préservées, des forêts périurbaines et des parcs urbains (Da Silva et al., 2023) ou suivant un gradient du milieu forestier aux sites urbains (De Vasconcellos & Callado, 2020; Gao et al., 2023), on observe un effet des revêtements imperméables et de la pollution atmosphérique sur leur anatomie. Certaines espèces d'arbres réagissent à l'urbanisation en améliorant leur sécurité hydraulique par l'augmentation de la fréquence des vaisseaux tout en réduisant leur diamètre (minimum, maximum et moyen) (Da Silva et al., 2023; De Vasconcellos & Callado, 2020). Par contre, les recherches portant sur l'anatomie des caractéristiques des vaisseaux au sein d'une même ville restent encore rares, malgré leur rôle central dans le transport de l'eau et donc dans les services écosystémiques rendus par les arbres.

Au niveau intra-urbain, en échantillonnant des arbres de rue et de parc, la réponse des traits de vaisseaux sembler varier selon les espèces. Certaines espèces n'ont montré aucune différence significative dans l'anatomie du bois entre sites pavés et non pavés, malgré des niveaux de stress hydrique accrue (Savi et al., 2015). D'autres espèces présentent une largeur de vaisseau plus faible, et/ou une augmentation de la fréquence des vaisseaux suggérant une sécurité accrue, tandis que d'autres présentent une augmentation du diamètre suggérant un transport d'eau plus efficace sous surface pavée (Li et al., 2020; Rissanen et al., 2025).

De plus, des réponses spécifiques aux contraintes abiotiques comme le sel ont été observées chez deux espèces de peuplier (*Populus* spp). Celles-ci ont montré une réduction du diamètre du lumen de vaisseau en étant exposé au NaCl, toutefois à des concentrations différentes, soit à 50 et 150 nM de sel, entraînant moins de cellules de xylème et des vaisseaux plus étroits. La conductivité hydraulique a significativement

chuté chez l'espèce la plus sensible, alors l'autre a seulement montré une tendance vers une diminution de conductivité hydraulique (Junghans et al., 2006).

1.3 Objectifs et hypothèses

Le but de cette étude est donc d'examiner comment le type de site de croissance et le climat influencent les traits anatomiques des vaisseaux pour mieux comprendre l'état de la disponibilité en eau des sites de croissance en milieu urbain, mais également comment les arbres s'ajustent à ces conditions. Précisément, nous évaluons l'effet du milieu de croissance sur l'anatomie des vaisseaux, en analysant la variation intraspécifique des caractéristiques des vaisseaux entre deux types de sites de croissance contrastés: les rues et les parcs. Nous évaluons également si les variations climatiques affectent le développement des vaisseaux pour chacune des espèces.

Nous analysons les traits de vaisseaux du bois de tige de plusieurs espèces courantes d'arbres urbains. Les espèces à zone poreuse sont *Ulmus pumila* L, *Ulmus americana* L, *Fraxinus pennsylvanica* Marsh, *Gleditsia triacanthos* L. et *Quercus macrocarpa* Michx. Les espèces à pores diffus sont *Acer saccharinum* L. et *Acer platanoides* L. Les arbres ont été échantillonnés à travers cinq villes canadiennes présentant un gradient de température et précipitation (Halifax, Montréal, Québec, Winnipeg et Edmonton). Cette approche permet d'évaluer si les arbres issus de climats différents ajustent différemment leur anatomie de xylème selon le type de site urbain. Les questions de recherche suivantes sont adressées: (i) les traits de vaisseaux diffèrent-ils entre les arbres de rue et de parc ? ii) ces différences varient-elles selon l'aridité de la ville?

La première hypothèse posée est que face aux conditions davantage arides en rue qu'en parc, les arbres de rue présenteraient des traits associés à une efficacité de transport de l'eau réduite par rapport aux arbres de parc, mais une sécurité accrue. Ces ajustements se reflèteraient par une différence au niveau des traits anatomiques de vaisseaux de xylème semblables aux différences intraspécifiques observées en milieu naturel. La première prédiction de l'hypothèse une est que les arbres de rues présentent un diamètre de vaisseaux plus faible que les arbres de parc. La seconde prédiction est que les arbres de rue présentent une fréquence de vaisseaux plus élevée que les arbres de parc. Ces deux ajustements anatomiques se reflèterait par une plus faible conductivité hydraulique théorique chez les arbres de rue que les arbres de parc.

La seconde hypothèse est que les différences entre les deux environnements de croissance seront plus prononcées dans les villes les plus arides où l'accès à l'eau est déjà restreint. Dans ces conditions, les

contraintes supplémentaires propres aux rues devraient accentuer le stress hydrique, poussant les arbres à développer davantage leur sécurité hydraulique.

1.3 Survol méthodologique

Sélection des villes

Cinq villes canadiennes ont été choisies, suivant un gradient climatique et géographique, passant de conditions humides et chaudes à des conditions plus arides et froides, et allant de l'océan Atlantique aux Rocheuses (Figure 2.1). Ce gradient permet d'évaluer si les réponses des arbres au type de site de croissance varient selon le contexte climatique.

Types de sites sélectionnés

Les arbres ont été échantillonnés dans deux environnements de croissance communs pour les arbres urbains et aux conditions contrastées afin de capturer une diversité des conditions de croissance en milieu urbain, soit les rues et les parcs. Dans les pages suivantes, le terme « site » désigne l'environnement de croissance (soit rue ou parc). Les parcs réfèrent à une zone aménagée où les arbres poussent dans une matrice majoritairement composée de pelouses tondue. Précisément, les arbres de parcs ont été échantillonnés dans des parcs aménagés, espaces verts, cimetières et terrains sportifs. Les parcelles de forêts naturelles (non plantées, dominées par les arbres et plantes autres que le gazon) sont donc exclues. Les arbres de rue poussaient dans des bandes gazonnées ou en fosses de trottoir, le long d'une rue (Figure A2).

Dans chaque ville, la sélection des arbres a été limitée à la zone la plus urbanisée, définie comme ayant une densité de population supérieure au 98^e percentile de l'ensemble de la zone urbaine de la ville. La densité de population a été extraite des ensembles de données GPWv4, révision 11 (CIESIN, 2018).

Sélection des espèces

Le choix des espèces pour cette étude (*Ulmus pumila* L., *Ulmus americana* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marsh., *Gleditsia triacanthos* L., *Quercus macrocarpa* Michx., *Acer saccharinum* L. et *Acer platanoides* L.) repose sur leur abondance dans les villes étudiées. Certaines espèces n'ont pas été échantillonnées dans toutes les villes parce qu'elles y étaient moins communes (Table 2.2)

Selon les professionnels du milieu de l'arboriculture en Amérique du Nord, les espèces les plus tolérantes à la sécheresse parmi celles que nous avons échantillonnées sont *Ulmus spp* et *Gleditsia triacanthos*. *Acer saccharinum* a été jugée comme la moins tolérante. De façon générale, *Gleditsia triacanthos*, *Quercus spp.*, et *Ulmus spp.* ont été jugée les plus tolérantes à l'ensemble des stress urbains (Carol-Aristizabal et al., 2024).

Traits mesurés

Deux traits de vaisseaux ont été mesurés sur des carottes prélevées au niveau du tronc, à hauteur de poitrine, et analysés par cerne annuel. Le premier trait, l'aire de lumen a été mesuré pour chaque vaisseau. À partir de cette valeur, le diamètre équivalent a été calculé, soit le diamètre d'un cercle ayant la même aire, ce qui permet de standardiser considérant que certains vaisseaux ont une forme elliptique. Le diamètre moyen a ensuite été calculé pour chaque cerne pour chacun des arbres. Le second trait étudié est la fréquence de vaisseaux, défini par le nombre de vaisseaux par mm^2 . Secondement, le nombre de vaisseaux par cerne a été compté et divisé par l'aire du cerne afin de déterminer la fréquence de vaisseaux en nombre par mm^2 . La conductivité hydraulique théorique spécifique, qui correspond à une estimation de la capacité de transport d'eau par unité de surface par unité de pression, a été calculée à partir du nombre et du diamètre de vaisseau. Cet indice est basé sur la loi de Hagen-Poiseuille et considère le rôle plus important de larges vaisseaux par rapport aux vaisseaux plus étroits dans le transport de l'eau (Table 2.3). Cet indicateur permet d'évaluer l'efficacité hydraulique.

Sélection des variables climatiques

La sélection des variables climatiques a été réalisée selon le type de bois des espèces. Pour les espèces à pores diffus, les variables climatiques de la saison de croissance précédente et de la saison de croissance courant ont été testées. Pour les espèces à zones poreuses, les variables de la saison de croissance précédente et du printemps en cours ont été testées, considérant que nous analysons seulement leur bois de printemps. Pour chacune des espèces et pour chaque trait, la variable donnant un modèle avec le plus faible AIC a été sélectionnée.

CHAPITRE II

Can trees adjust to urban conditions through modifying their xylem? A study across five Canadian cities.

Abstract

Urban trees are exposed to heterogenous and often challenging growth conditions, such as limited water availability and high temperatures. Understanding how trees acclimate to these conditions is important to understand their survival and provision of ecosystem services. This study compared xylem vessel traits linked to hydraulic safety and efficiency (diameter, frequency) of seven common urban trees species across two contrasting urban sites: park and streets. The trees were sampled in five Canadian cities spanning a climatic gradient, to allow us to determine if their xylem anatomy was also influenced by regional climate. Considering street trees are exposed to greater drought stress, they were expected to invest in traits reflecting greater safety such as narrower and more abundant vessels than park trees. Our results showed that site type did not have a systematic effect on vessel traits, but rather that the magnitude and direction of the response was species specific and varied across cities. This study highlights the complexity of urban tree hydraulic and the importance of considering local growth conditions.

Keywords: xylem vessels, urban trees, acclimation, hydraulic safety, climate change adaptation

2.1 Introduction

Urban trees are increasingly recognized as playing a key role in maintaining comfortable cities, by cooling air through shade and transpiration, as well as maintaining psychological wellbeing. Trees are often planted to mitigate urban heat; however, the provision of cooling and other benefits relies on the vigour and health of the tree themselves as they are exposed to the very stresses they are intended to alleviate. For instance, higher air temperature increases vapor pressure deficit (Peters et al., 2010), increasing water loss in trees and exposes them to drought stress.

However, urban environments being highly heterogenous, air temperatures can vary substantially within a single city, comparable to the difference between a city center and nearby rural region, with daytime temperatures increasing linearly with impervious surface cover (Ziter et al., 2019).

Streets, which occupy a large proportion of public space, are often associated with increased drought stress. Daytime air temperatures rise linearly with the proportion of impervious surfaces (Ziter et al., 2019), which not only limit rainwater infiltration but also increase soil temperatures and restrict root growth, exacerbating drought stress (Armson et al., 2013; Celestian & Martin, 2004; Graves & Dana, 1987; Yang & Zhang, 2011). Trees located along streets often exhibit reduced vigour and growth (Sand et al., 2018; Kostic et al., 2019; Nillson et al., 2001). In cold climates, this stress can be further intensified by de-icing salts, applied to roads and sidewalks but being found in soils around street trees, altering soil chemistry, reducing root growth, and limiting water uptake (Equiza et al., 2017; Hofman et al., 2012; Kamaluddin & Zwiazek, 2004; Tang et al., 1993). Green areas such as parks are considered to offer favorable growing conditions for trees as they present cooler, more stable air temperature (Upmanis et al., 1998; Watkins et al., 2002; Yan et al., 2018) and greater soil moisture retention (Nielsen et al., 2007).

Some species appear able to acclimate to these diverse conditions as they maintain radial growth under high levels of impervious surface coverage (Fini et al., 2022; Rissanen-Vitali et al., in prep). In some cases, supplemental water availability in streets through leaky aqueducts and root intrusions into sewage systems may offset drought stress (Kuliczowska et al., 2017; Östberg et al., 2012). Given these mixed influences, it is essential to understand how trees perceive and respond to local growing conditions, and how they are able to maintain sufficient and safe water transport. Such mechanisms directly influence tree growth, but also gas exchanges and thus benefits provided by urban trees to citizens such as cooling through transpiration.

In angiosperm trees, the dominant type of trees in most North American cities, water transport occurs through xylem vessels. Vessel traits such as lumen diameter and vessel frequency (number of vessels per unit area of cross-sectional xylem) play a key role in determining water transport efficiency and hydraulic safety. While larger vessels enhance efficiency by influencing the velocity and quantity of water flow as described by the Hagen-Poiseuille equation (Tyree & Zimmermann, 2002), larger vessels are also correlated with increased xylem vulnerability to cavitation (Awad et al., 2010; Fisher, 2007; Hacke et al., 2006; Jacobsen et al., 2023; Lobo et al., 2018). This reflects an important hydraulic trade-off between maximizing water transport efficiency and ensuring safe water transport. Increasing vessel frequency can mitigate the risk of embolism and increase hydraulic safety by providing alternate pathways for water transport (redundancy). Trees in arid areas tend to grow narrower vessels often with increased vessel frequency than trees of the same species growing in more humid areas (Alon et al., 2024; Fontes et al., 2022; García-Cervigón et al., 2020). Thus, vessel traits can provide insight on acclimation to drought, but also on how trees perceive local growing conditions.

Patterns of vessel traits variation are much less documented in urban settings, where conditions can vary over short distance. Most studies have focused on comparisons across different cities or between cities and surrounding rural areas (Da Silva et al., 2023; De Vasconcellos & Callado, 2020; Zhu et al., 2023), whereas the within-city scale remains poorly studied (Li et al., 2020; Rissanen et al., 2025).

This study aims to investigate how urban growing site type (parks vs street trees) shape xylem vessel traits such as lumen diameter and vessel frequency. Understanding these responses can provide insights into tree hydraulic adjustments and inversely provide information on how trees perceive these ecological conditions. We analyzed stem xylem vessel traits of several common urban tree species. Ring-porous species include *Ulmus pumila* L., *Ulmus americana* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marsh, *Gleditsia triacanthos* L., and *Quercus macrocarpa* Michx. Diffuse-porous species include *Acer saccharinum* L. and *Acer platanoides* L. Trees were sampled across five Canadian cities spanning a gradient of temperature and precipitation (Halifax, Montreal, Quebec, Winnipeg, and Edmonton). This approach allows us to assess whether trees from different climates adjust their xylem anatomy differently depending on the type of urban site. The research questions addressed are: (i) do vessel traits differ between street and park trees? and (ii) do these differences vary according to city aridity?

The first hypothesis is that, given the drier conditions in streets compared to parks, street trees will exhibit traits associated with reduced water transport efficiency but increased hydraulic safety relative to park trees. These adjustments are expected to be reflected in xylem vessel anatomical traits similar to intraspecific differences observed in natural environments. The first prediction of this hypothesis is that street trees will have smaller vessel diameters than park trees. The second prediction is that street trees will have a higher vessel frequency than park trees.

The second hypothesis is that differences between the two growth environments will be more pronounced in the most arid cities, where water availability is already limited. Under these conditions, additional stressors associated with street environments are expected to exacerbate water stress, pushing trees to develop even greater hydraulic safety.

2.2 Materials and Methods

2.2.1 Study area

Wood cores were collected in 2017, 2021 and 2022 (May to September) from trees in the Canadian cities of Edmonton, Winnipeg, Montreal, Quebec, and Halifax (Figure 2.1). The study area covers a range of climates and a geographical expanse from the Rocky Mountains to the Atlantic Ocean (Table 2.1).

Within each city, sampling was restricted to the most urbanized area, defined by a population density higher than the upper 98th percentile of that particular city (CIESN, 2018). Within these areas, trees were chosen from street sites, including boulevard planting strips or sidewalk pits, and park sites, defined as managed parks, green spaces, cemeteries, or sport areas with a grass cover (Figure A2). Only trees in the public domain were selected.

Table 2.1 Latitude, longitude, population density and mean growing season climate of the study cities. Climate data are 2000–2020 normals (Environment and Climate Change Canada 2024). Population density: City population density (Statistics Canada, 2021). Growing season PPT: Growing season sum of the total rainfall (mm). Growing season T: Growing season mean temperature (°C). Growing season CMD: Growing season mean climate moisture deficit index calculated as $PPT - PET$. PET : potential evapotranspiration. A positive CMD indicates wet and moist conditions.

City	Latitude	Longitude	Population density (inhabitants/km ²)	Growing season PPT (mm)	Growing season T (°C)	Growing season CMD
Halifax	44.6488	-63.5723	1463.1	801	13.5	472
Quebec	46.8139	-71.2082	1214.8	777	12.9	292
Montreal	45.5017	-73.56762	4833.5	663	14.9	90
Winnipeg	49.8951	-97.1384	1623.3	496	12.9	-131
Edmonton	53.5461	-113.4938	1320.4	343	11.0	-280

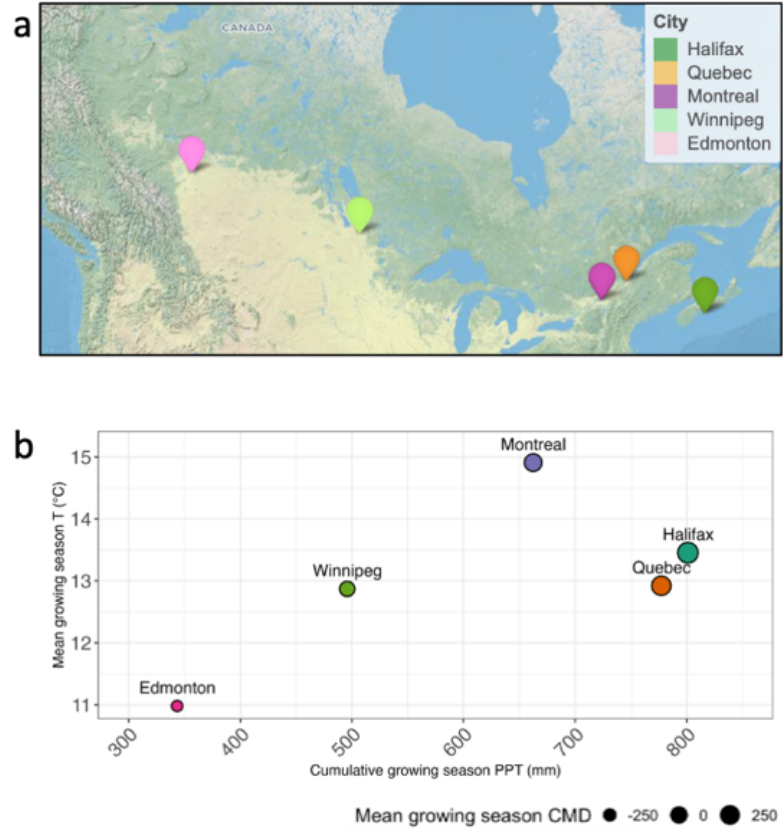


Figure 2.1 a) Map of the studied Canadian cities. b) Mean growing season climate of the study cities. Climate data are 2000–2020 normals (Environment and Climate Change Canada 2024). Growing season PPT: Growing season sum of the total rainfall (mm). Growing season T: Growing season mean temperature (°C). Growing season CMD: Growing season mean climate moisture deficit index calculated as $PPT - PET$ (potential evapotranspiration). A positive CMD indicates moist conditions.

2.2.2 Tree species and tree selection

Tree species were chosen based on their commonness and availability across the cities. The selected species include diffuse porous *Acer platanoides* L. and *Acer saccharinum* L., and ring porous *Fraxinus pennsylvanica* Marsh, *Gleditsia triacanthos* L., *Quercus macrocarpa* Michx., *Ulmus pumila* L. and *Ulmus americana* L. Not all species could be sampled in all cities. Within each city, for each species and site type, 8 to 13 trees with a diameter at breast height (DBH) ranging from 30 to 70 cm were selected (Table 2.2). For each species, trees of similar height were selected within each city. We did not consider each tree ring's cambial age in our analysis, as we didn't have that information. However, tree selection was done within each species to standardize tree height (Figure A2). Leaning trees and those with visible symptoms of stress were avoided. A maximum of seven (most often five) trees were selected along the same strip of a street or within the same park to better cover the conditions of interest.

Table 2.2 Distribution of sampled trees across species, cities and sites.

Species	Abbreviation	Woodtype	Halifax		Montreal		Quebec		Winnipeg		Edmonton	
			Street	Park	Street	Park	Street	Park	Street	Park	Street	Park
<i>Acer platanoides</i>	AcPl	Diffuse porous	8	10	13	12						
<i>Acer saccharinum</i>	AcSa	Diffuse porous			11	8	11	12			11	13
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	FrPe	Ring porous			13	12	10	13	12	10	9	12
<i>Gleditsia triacanthos</i>	GITr	Ring porous			10	13	10	13				
<i>Quercus macrocarpa</i>	QuMa	Ring porous									10	10
<i>Ulmus pumila</i>	UIPu	Ring porous			11	8	11	10	13	11	10	11
<i>Ulmus americana</i>	UIAm	Ring porous	9	11								

2.2.3 Tree core preparation and anatomical measurements

Tree cores were extracted at breast height using 5 mm increment borers and prepared using standard dendrochronological methods, including sanding up to 600 grit (Phipps, 1985). They then underwent a preliminary step of soaking in water overnight for rehydration. Diffuse-porous species were sectioned following the *Micro* protocol, ring-porous sample preparation followed the *Stereo* protocol from Fonti et al. (2009), and guidance from von Arx et al. (2016) and Gartner et al. (2015) (Figure A3). The latter procedure doesn't recognize vessels less than 6000 μm^2 which corresponds with the smaller earlywood vessels transitioning to latewood (Fonti et al., 2009).

Diffuse-porous species: Micro procedure

Cores were softened in boiling water for an hour and cut into 50 mm long segments. From one to three sections were prepared per core to cover all the required rings. Using a WSL-Core-microtome (Sandro Lucchinetti, Schenkung Dapples, Zurich) micro-sections 20-35 μm thick (species dependent) were cut. Before the final cut was made, cores were embedded with starch-based non-newtonian fluid to avoid cell structure damage. The fluid was a solution of cornstarch, water, and glycerol at a 10:8:7 ratio (Schneider & Gärtner, 2013). Sections were rinsed with distilled water, stained with Safranin-O (0.1%), and rinsed again with distilled water until clear. Samples were mounted on temporary slides and embedded in glycerol for microscopy. Images were captured at 40 X magnification using an optical microscope Olympus CX23 mounted with an Olympus LC35 camera and using LCMicro software.

Ring-porous species: Stereo procedure

Cores were dyed with a black marker to enhance visibility, and air-dried. This process was repeated three times. Vessel lumina was then filled with white chalk to increase contrast. Excess chalk was dusted off. Image capture was performed at 45 X magnification using an Olympus SZ61 stereo microscope mounted with an AmScope MU1803-HS camera controlled in AmScope software.

For both diffuse and ring-porous samples, multiple overlapping images (~25 %) were stitched using PTGui (PTGui v. 13, New House Internet Services BV, Rotterdam, Netherlands) to create a panorama minimizing distortion.

2.2.4 Data extraction

A sequence of minimally 10 years was analyzed, from 2008 to 2017. For trees sampled after 2017, more recent years were also included (e.g.: 2008 to 2021).

Vessel lumen and number measurements were done per tree ring using the image-analysis software WinCELL v. 2022a (Régeants Instruments Inc, Quebec, Canada). Cell width and height for each individual vessel, as well as the area of the analyzed region (earlywood or entire ring) were obtained. For ring-porous species, the area of interest was restricted to earlywood, which was manually defined as the region from the start of the growth ring to the point where a visible reduction in vessel diameter occurred. Using these measurements and following recommendations from Scholz et al., 2013, the following traits were calculated per tree ring (Table 2.3):

Table 2.3 Vessel traits description and measurement method

Acronym	Trait	Description	Measurement	Unit
VD	Mean equivalent circle diameter	Diameter of the circle having the same area as the measured cell lumen. Averaged over all vessels	$(1/n) \sum (\sqrt{4A_i} / \pi)$ Where A is the cell's lumen area, n the number of vessels in the area of interest (aoi).	μm
VF	Vessel frequency	Average number of vessels per mm^2 . Indicator of redundancy	n / aoi Where n is the number of vessels.	n / mm^2
Kh	Xylem specific theoretical hydraulic conductivity	Anatomy based estimate of specific hydraulic conductivity per unit area.	$(\pi \sum d^4 / 128 \eta) / \text{aoi}$ Where d is vessel radius. η is the viscosity of water (1.002–9 MPa s) at 20 °C	$\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$

2.2.5 Statistical analyses

To evaluate the effect of site type on vessel diameter and frequency, we fitted a linear mixed-effects model for each species and for each measured trait, which yielded seven separate models per trait. Models were fitted using the lme4 package (Bates et al., 2015). Fixed factors included site type (park or street) in interaction with city to test whether the effect of site varied with city, and a climate variable centered within each city. For species sampled in a single city, fixed effects only included site type and a climate variable. When it improved model performance, tree height was included due to its potential allometric effect on vessel size (Carrer et al. 2015) and was centered within each species to account for the slight differences in trees between cities (Figure A1).

The climate variable was selected for each species based on the lowest Akaike Information Criterion (AIC). We tested multiple variables for each trait and species relevant to vessel development: mean temperature ($^{\circ}\text{C}$), cumulative precipitation (mm) and an index for moisture balance, the heat moisture index (HMI), calculated as $(\text{mean temperature} + 10) / (\text{mean precipitation} / 1000)$ (Wang et al., 2006). A higher HMI value indicates lower moisture availability.

For diffuse-porous species, the variables were tested for each season (spring, summer and fall) and for the full growing season (March to October) in the current and previous year. For ring-porous species, solely previous year and current spring climate metrics (March to June) were tested, as the wide early wood vessels are typically produced during the beginning of the seasonal growth (Takahashi et al., 2013). Earlywood traits seem to be affected by conditions during the year prior to ring formation, likely due to the

role of carbohydrate reserves for their development. In other words, environmental conditions also play a role in vessel formation onset and differentiation (Fonti & García-González, 2004; Kormann et al., 2024; Matisons and Brümelis, 2012; Pérez-de-Lis et al., 2017; Tardif & Conciatori, 2006). Climate data were generated for city centers from ClimateNA, which provides gridded climate surfaces for North America (Wang et al. 2016). All climate variables were centered prior to analysis.

To account for the repeated measures structure of our data (multiple ring-level observations per tree), we included tree identity as a random factor. Year was also included as a random factor to account for annual variation not fully captured by the climate variable or other year specific effects. Complete model structures are presented in Table A2.

Model convergence was verified for each model. Residual normality and homoscedasticity were verified through visual inspection of Q-Q plots.

Example of a model:

$$\text{vessel trait} \sim \text{Site} * \text{City} + \text{Climate} + (1 | \text{TreeID}) + (1 | \text{Year})$$

For each model, we calculated both marginal and conditional coefficients of determination using the `r.squaredGLMM` function from the package `MuMin` (Bartoń, v. 1.48.11). To evaluate potential trade-offs between vessel diameter and density, we computed Pearson correlation coefficients, for all trees, and grouped by species and site type using the `cor` function. All statistical analyses were conducted in R (R Core Team, 2024).

2.3 Results

Except for a trade-off between the diameter of vessels and their frequency, our results showed that the effect of urban site type (street vs. park) on xylem vessel traits was not consistent across species and traits, and that species were sensitive to different climate variables (Figure 2.2; Figure 2.3).

2.3.1 Vessel Diameter

For *Acer platanoides*, although the overall effect of site was only marginally significant ($p = 0.0671$; Figure 2.2; Table 2.4), its effect varied by city ($p < 0.001$; Figure 2.2; Table 2.4). Within cities, street trees had

narrower vessels than park trees only in Montreal ($p = 0.00005$; Table B1). Street trees' vessel diameter tended to be smaller in Montreal than those of Halifax ($p = 0.08$; Figure 2.2; Table B2), but park trees in Montreal had larger vessels than Halifax park trees ($p = 0.0023$; Figure 2.2; Table B2).

For *Acer saccharinum*, site type had a significant effect ($p = 0.0367$) that varied by city ($p = 0.0121$; Figure 2.2; Table 2.4). Street trees also had smaller vessels than park trees in Montreal ($p = 0.0074$; Figure 2.2; Table B1). A similar trend was observed in Quebec ($p = 0.060$), but not in Edmonton ($p = 0.226$; Figure 2.2; Table B1).

The effect of site type varied by city for *Ulmus pumila* which had narrower vessels in street rather than park trees in Montreal ($p = 0.0032$), while the same species had a larger vessel in street trees in Edmonton ($p = 0.037$) and showed no difference in site types both Winnipeg and Quebec (Figure 2.2; Table B1). Between cities, *Ulmus pumila* had lower vessel diameter in street sites in Montreal than those in all the other cities ($p = 0.00045$, $p = 0.0212$, $p = 0.0077$; Figure 2.2; Table B2) but similar vessel size in park trees.

Gleditsia triacanthos showed only a marginal trend towards narrowed vessels in street trees ($p = 0.024$; Figure 2.2; Table 2.4). *Ulmus americana* street trees had larger vessel diameter than park trees ($p = 0.0047$; Figure 2.2; Table 2.4). *Fraxinus pennsylvanica* and *Quercus macrocarpa*'s vessel diameter was not affected by site type in any of the cities (Figure 2.2; Table B1).

2.3.2 Vessel Frequency

Vessel frequency also showed species and city specific responses to urban site type (street or park). Overall site type effects were observed for *Acer platanoides* ($p = 0.0078$; Table 2.4), *Acer saccharinum* ($p = 0.0407$; Table 2.4) and *Ulmus americana*, which was sampled in a single city ($p = 0.0028$; Table 2.4). *Acer platanoides* and *Acer saccharinum* street trees showed higher vessel frequency than park trees, while *Ulmus americana* park trees had higher vessel frequency than street trees (Figure 2.3). *Ulmus pumila* showed more vessels per unit area in street trees in Montreal but the opposite effect was observed in Edmonton ($p = 0.069$ and $p = 0.019$, respectively; Figure 2.3; Table B1). *Fraxinus pennsylvanica* also exhibited higher frequency in street trees in Quebec ($p = 0.035$; Figure 2.3; Table B1). No significant pattern was observed for *Quercus macrocarpa* (Figure 2.3; Table B1).

When comparing sites across cities, *Ulmus pumila* street trees in Montreal exhibited higher vessel frequency than in all other cities ($p < 0.001$; Figure 2.3; Table B2). For *Fraxinus pennsylvanica*, Montreal park trees had lower vessel frequency than Winnipeg parks ($p = 0.03$; Figure 2.3; Table B2).

2.3.3 Hydraulic conductivity

Parallel to what was observed for vessel diameter and frequency, site type effect on xylem specific hydraulic conductivity was species and city dependent (Figure 2.5). For *Acer platanoides*, vessel traits of park trees in Montreal were wider but less frequent and also showed higher theoretical hydraulic conductivity ($p = 0.0392$; Figure 2.5; Table B1). In Halifax, *Acer platanoides* trees had smaller vessels in parks, with no major difference in vessel frequency, and showed lower hydraulic conductivity ($p = 0.0032$; Figure 2.5; Table B1). For *Ulmus pumila*, which exhibited a shift towards smaller and more numerous vessels in street sites in Montreal, hydraulic conductivity did not differ between the site types, indicating that the increase in vessel frequency compensated for the narrower vessels). Although *Ulmus americana* showed the opposite relationship where smaller and more numerous vessels were observed in park trees, its hydraulic conductivity was also similar in both site types. Albeit marginal, a trend was observed for *Ulmus pumila* to form larger vessels in street sites in Edmonton ($p = 0.0889$; Figure 2.5; Table B1) that significantly increased its hydraulic conductivity ($p = 0.0352$). *Gleditsia triacanthos*, which showed distinguishably larger vessels in park trees, was not impacted in its hydraulic conductivity. No significant effects of site, city, nor their interaction were detected for *Fraxinus pennsylvanica* and *Quercus macrocarpa* (Figure 2.5; Table 2.4).

2.3.4 Climate effect on vessel traits

For vessel diameter, *Acer saccharinum* and *Fraxinus pennsylvanica* showed increased vessel diameter with, respectively, growing season and previous summer precipitation ($p = 0.0063$; $p = 0.0051$; Table 2.4). In *Ulmus americana*, vessel diameter decreased as spring temperature increased ($p = 0.0017$; Table 2.4).

Spring aridity decreased vessel frequency for *Acer platanoides* but increased it for *Fraxinus pennsylvanica* and marginally for *Quercus macrocarpa* ($p = 0.076$; Table 2.4). Vessel frequency decreased for *Gleditsia triacanthos* with low summer precipitation in the previous year ($p=0.0038$; Table 2.4), while vessel frequency increased in *Ulmus americana* as spring temperature increased ($p=0.0488$; Table 2.4).

Hydraulic conductivity declined with increasing spring aridity in *Acer platanoides*, despite a non-significant reduction in vessel diameter ($p = 0.157$; Table 2.4), and was accompanied by a significant increase in vessel frequency. *Acer saccharinum* and *Ulmus americana* showed marginal declines in conductivity with

increasing spring aridity and spring temperature, respectively. In contrast, *Fraxinus pennsylvanica* exhibited a significant increase in hydraulic conductivity with spring aridity ($p = 0.033$; Table 2.4).

2.3.5 Model Performance

Fixed effects (site type, city, and their interaction) explained 6.6–31.0% of variance in vessel diameter, 7.5–34.3% for vessel frequency, and 2.5–25.9% for theoretical hydraulic conductivity (R^2_m ; Table 2.4). Full models including random effects explained 65.0–82.9% of total variance for vessel diameter, 65.4–81.2% for vessel frequency, and 58.6–79.7% for hydraulic conductivity (R^2_c ; Table 2.4). Random effects (individual tree variation, yearly fluctuations) accounted for the majority of observed variance in xylem vessel traits. *Ulmus americana* and *Quercus macrocarpa*, which were sampled from a single city, generally showed higher marginal R^2 values, as city-level variation was not contributing to the random effects.

Table 2.4 Results from linear mixed model analysis on mean vessel diameter, vessel frequency and theoretical hydraulic conductivity with the effect of site type (street or park), city, and their interaction, and climate. Statistical significance is indicated by asterisks, with * denoting $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ and *** $p < 0.001$. R^2 values are reported as marginal (R^2_m) and conditional (R^2_c). n: number of tree rings observations.

Trait	Species	Site		City		Site x City		Climate		R ²		n
		F	P	F	P	F	P	F	P	M	C	
VD	AcPl	3.55	0.067.	5.21	0.028*	15.92	0.001***	2.06	0.157	0.31	0.83	439
	AcSa	4.58	0.037*	5.17	0.009**	4.74	0.012*	7.58	0.006**	0.25	0.82	732
	FrPe	0.09	0.761	1.91	0.134	0.70	0.555	7.90	0.005**	0.07	0.71	1096
	UIPu	0.27	0.604	4.47	0.006**	3.23	0.027*	1.12	0.295	0.19	0.77	1002
	GITr	3.17	0.084.	0.95	0.337	1.56	0.221	0.65	0.438	0.11	0.65	457
	UIAm	10.57	0.005**	—	—	—	—	17.94	0.002**	0.29	0.75	239
	QuMa	0.75	0.399	—	—	—	—	2.11	0.174	0.15	0.65	222
VF	AcPl	7.86	0.155	2.10	0.646	0.21	0.646	9.05	0.004**	0.16	0.77	439
	AcSa	4.38	0.363	1.03	0.314	1.18	0.314	0.49	0.483	0.08	0.69	732
	FrPe	0.17	0.001**	5.73	0.040*	2.89	0.040*	14.18	< 0.001***	0.18	0.77	1096
	UIPu	1.67	< 0.001***	13.77	0.029*	3.18	0.029*	0.00	0.971	0.34	0.81	1002
	GITr	2.71	0.043*	4.44	0.406	0.71	0.406	8.57	0.004**	0.13	0.69	457
	UIAm	12.14	0.155	—	—	—	—	4.94	0.049*	0.29	0.72	239
	QuMa	1.24	0.363	—	—	—	—	3.85	0.076.	0.24	0.70	222
Kh	AcPl	0.19	0.669	0.10	0.758	12.29	0.001**	4.35	0.050*	0.18	0.77	439
	AcSa	1.40	0.242	7.76	0.001**	3.66	0.032*	3.68	0.061.	0.26	0.80	732
	FrPe	0.01	0.930	4.09	0.009**	0.12	0.950	4.66	0.033*	0.10	0.72	1096
	UIPu	0.16	0.687	1.61	0.194	3.04	0.034*	0.57	0.451	0.10	0.68	1002
	GITr	2.12	0.155	2.81	0.103	0.32	0.573	1.52	0.218	0.09	0.66	457
	UIAm	2.84	0.110	—	—	—	—	4.74	0.053.	0.11	0.71	239
	QuMa	0.02	0.885	—	—	—	—	1.06	0.326	0.02	0.58	222

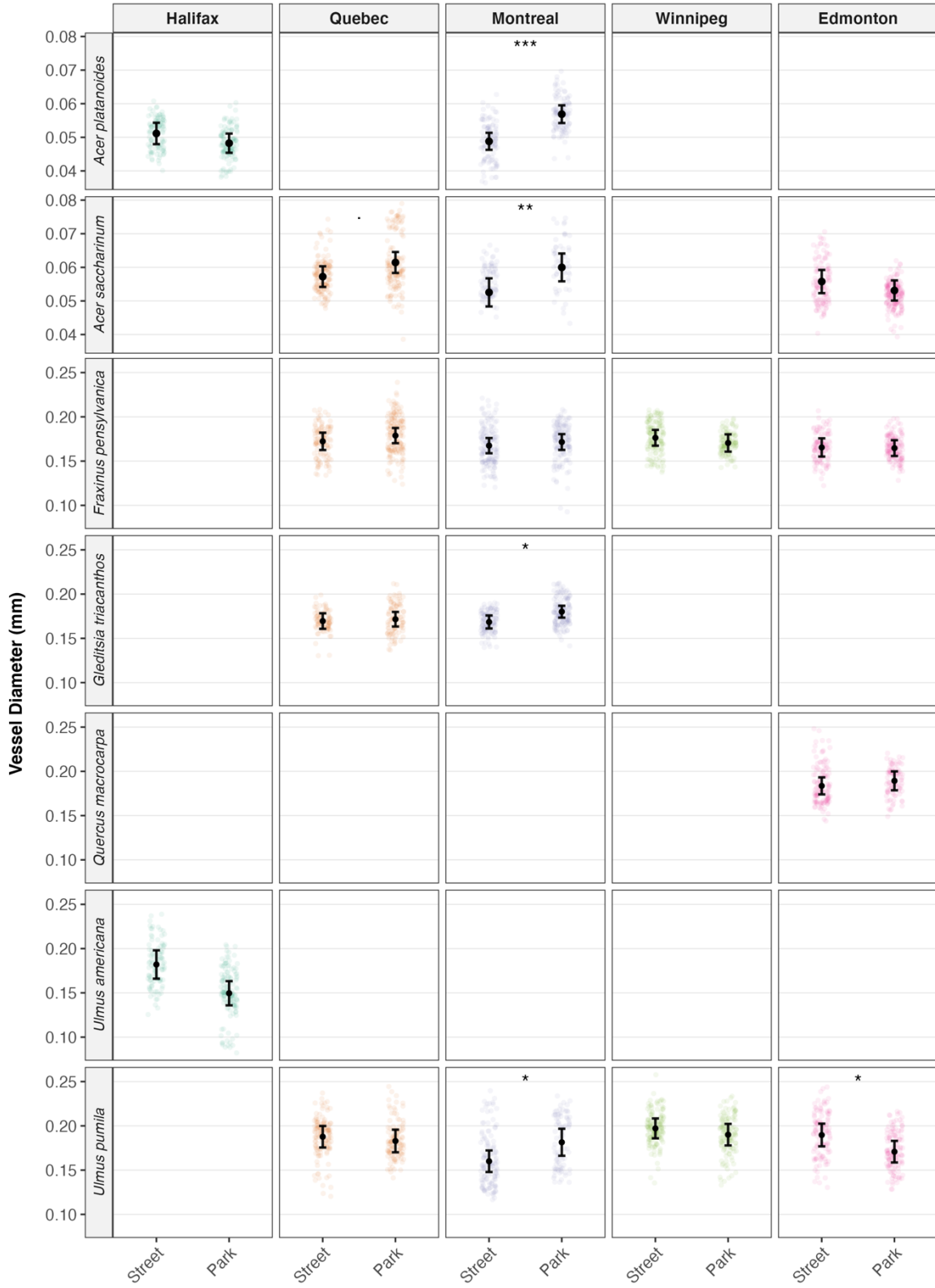


Figure 2.2 Predicted mean vessel diameter. From left to right the least to driest cities. The colored points indicate observations at the tree ring level. Black points indicate model predictions, and the black lines represent 95% CI. Note that the y axis changes from diffuse (top two) to ring porous (bottom five) species. Statistical significance of site type according to post-hoc tests is indicated by asterisks, with * denoting $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ and *** $p < 0.001$.

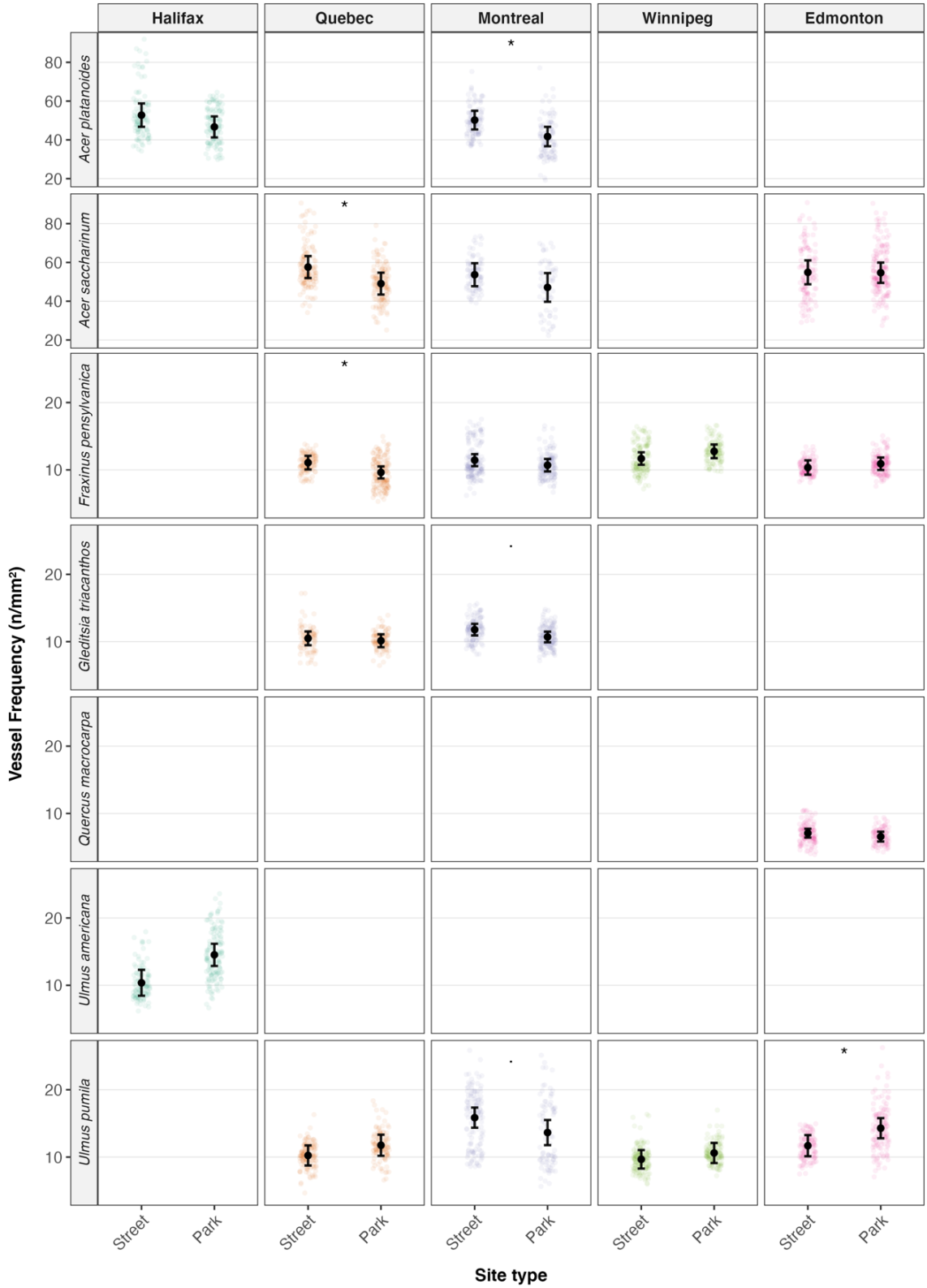


Figure 2.3 Predicted mean vessel frequency. From left to right the least to driest cities. The colored points indicate observations at the tree ring level. Black points indicate model predictions, and the black lines represent 95% CI. Note that the y axis changes from diffuse (top two) to ring porous (bottom five) species. Statistical significance of site type according to post-hoc tests is indicated by asterisks, with * denoting $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ and *** $p < 0.001$.

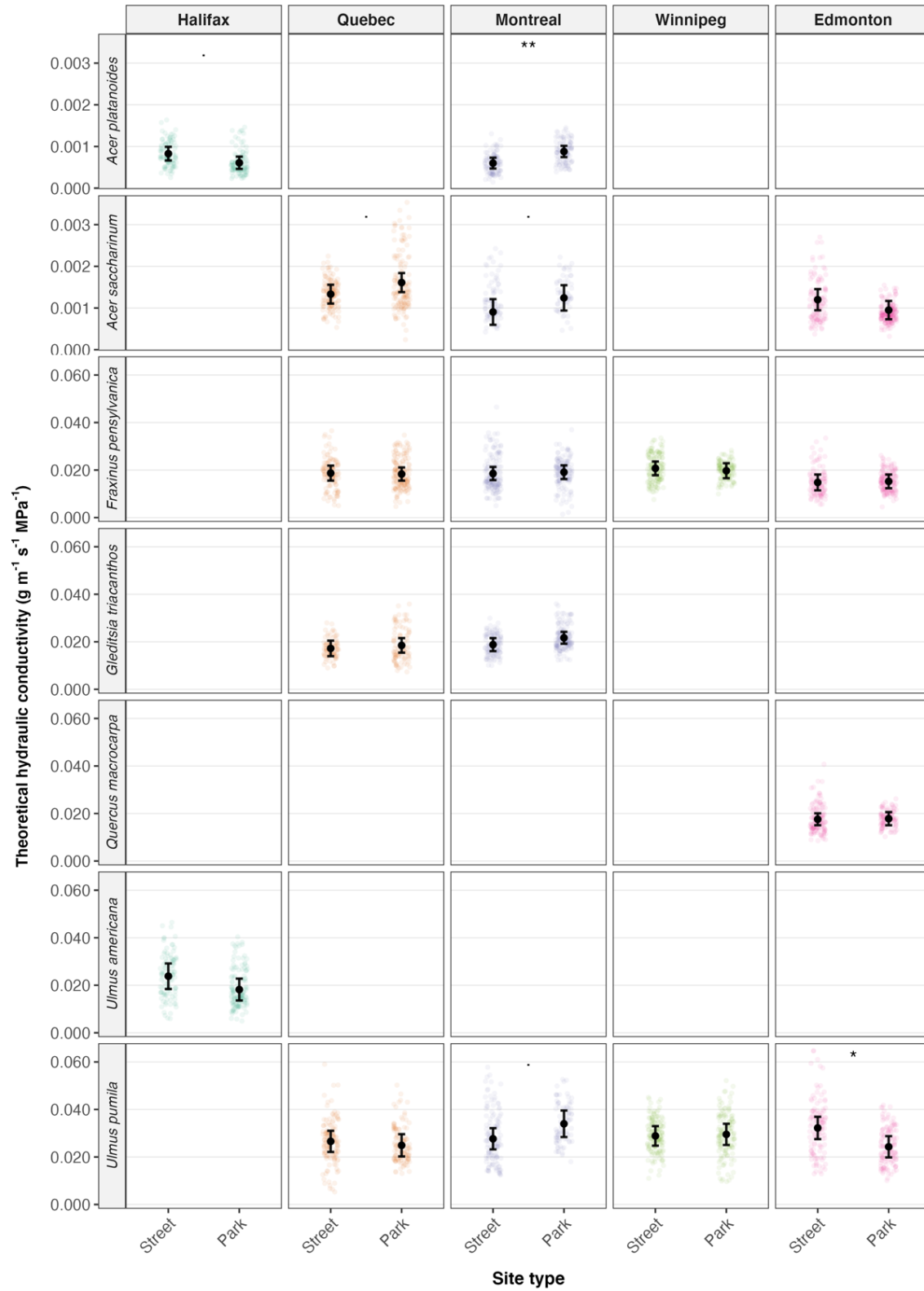


Figure 2.4 Predicted xylem specific hydraulic conductivity. From left to right the least to driest cities. The colored points indicate observations at the tree ring level. Black points indicate model predictions, and the black lines represent 95% CI. Note that the y axis changes from diffuse (top two) to ring porous (bottom five) species. Statistical significance of site type according to post-hoc tests is indicated by asterisks, with * denoting $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ and *** $p < 0.001$.

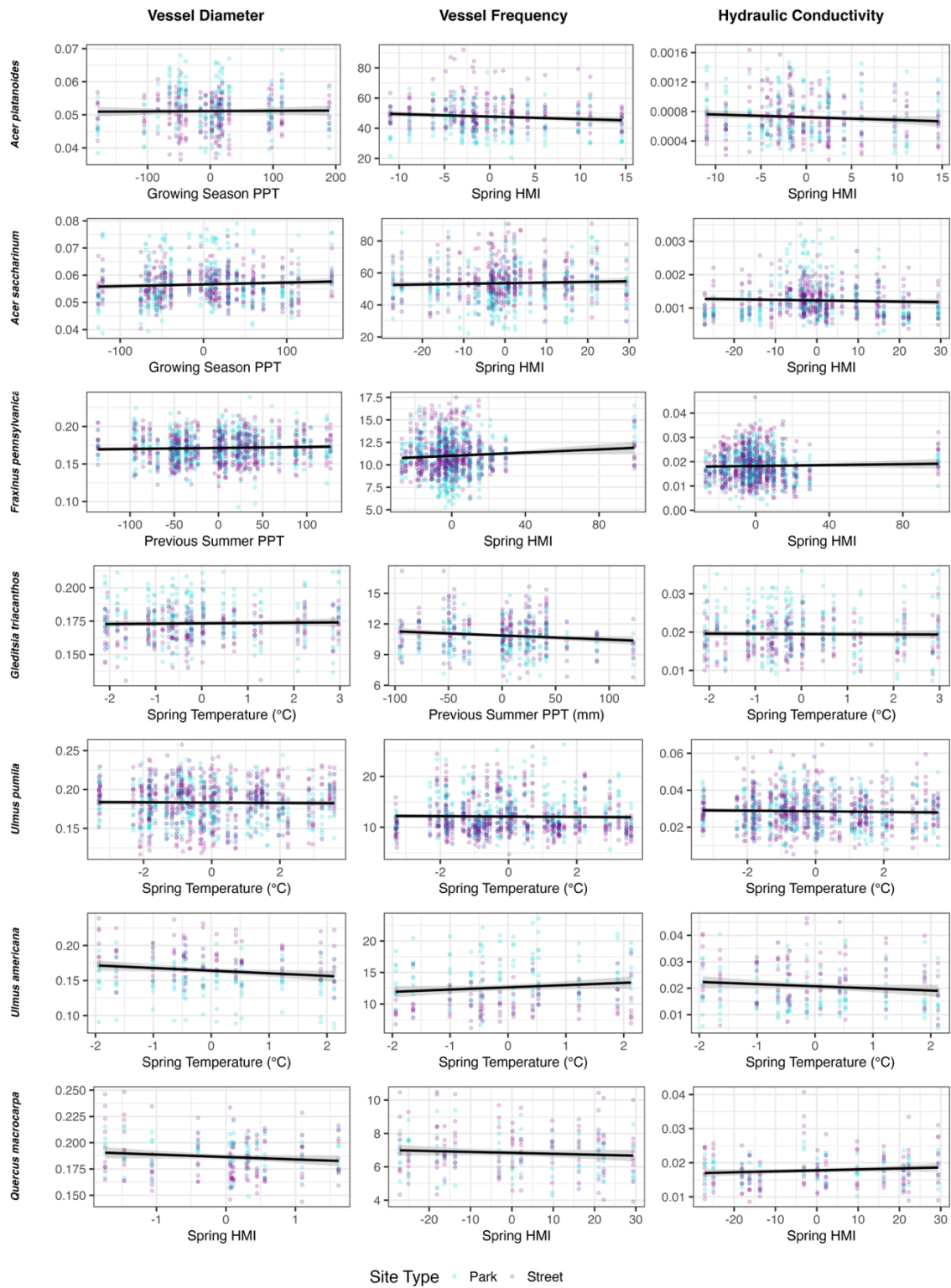


Figure 2.5 Climate effects on vessel traits. Points show individual tree ring observations, colors indicate site type. Black lines indicate overall climate effects with 95% CI in grey shaded area. Each row is a species, and each column is a vessel trait. Climate variables are species and trait specific and centered within each city. HMI: Heat moisture index, a higher value represents more arid conditions. PPT: precipitation.

2.3.6 Pearson's correlation coefficients between vessel diameter and vessel frequency

Across all species, the correlations between vessel density and frequency were negative, ranging from -0.29 to -0.78, indicating a general trade-off between the diameter of vessels and their frequency. The strongest correlation observed was for *Ulmus pumila* in park trees ($r = -0.78$) and the weakest correlation observed was for *Acer platanoides* street trees ($r = -0.29$) (Figure 2.6; Table 2.6). Stronger negative correlations were often observed in park trees compared to street trees. In contrast, correlations were generally weaker or more variable in streets, except for *Gleditsia triacanthos* ($r = -0.49$ in street trees and -0.41 in park trees) and *Ulmus americana* ($r = -0.61$ for both site types).

Table 2.6 Pearson's correlation coefficients between vessel diameter and vessel frequency for each species and site. n : the number of tree ring observations.

Species	Site Type	Pearson's r	n
<i>Acer platanoides</i>	Park	-0.4413	221
<i>Acer platanoides</i>	Street	-0.2885	218
<i>Acer saccharinum</i>	Park	-0.6129	377
<i>Acer saccharinum</i>	Street	-0.3624	355
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	Park	-0.5530	565
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	Street	-0.4572	531
<i>Gleditsia triacanthos</i>	Park	-0.4143	244
<i>Gleditsia triacanthos</i>	Street	-0.4868	213
<i>Quercus macrocarpa</i>	Park	-0.7508	97
<i>Quercus macrocarpa</i>	Street	-0.6608	125
<i>Ulmus americana</i>	Park	-0.6134	135
<i>Ulmus americana</i>	Street	-0.6146	104
<i>Ulmus pumila</i>	Park	-0.7836	464
<i>Ulmus pumila</i>	Street	-0.7278	538

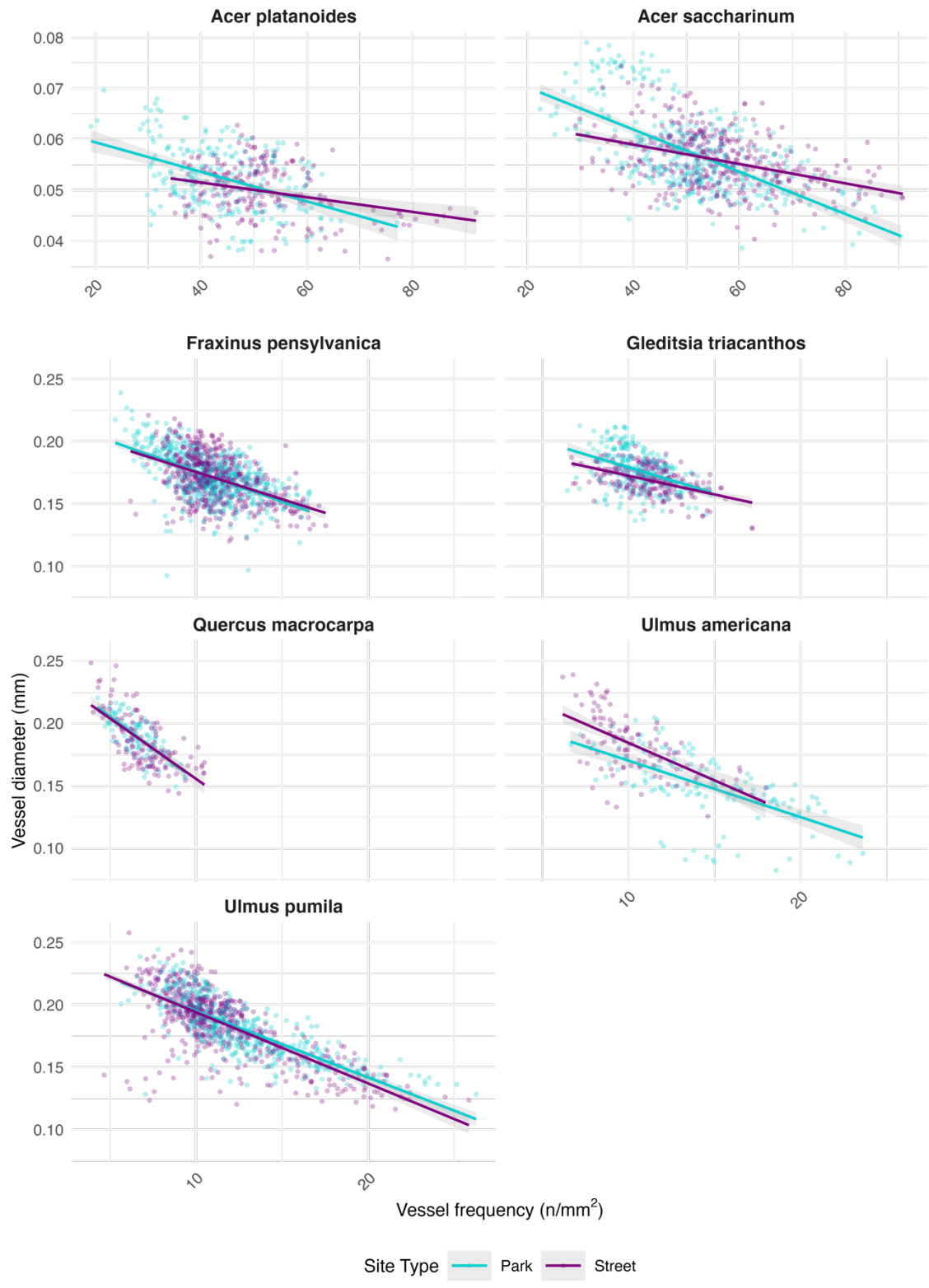


Figure 2 6 Correlations between vessel frequency and vessel diameter across site types. Points indicate individual tree ring observations. Note that the x and y axis are not the same for the diffuse (top two) and ring porous species (bottom five).

2.4 Discussion

This study examined the effect of urban site type (park or street) on xylem vessel traits (mean diameter, density and specific hydraulic conductivity) in seven common urban tree species following a climatic gradient across five Canadian cities. We hypothesized that street trees, subject to greater drought stress, would display traits indicative of reduced hydraulic conductivity but greater safety (i.e. narrower vessels, higher frequency), and that these differences would be more pronounced in drier cities.

Our results partially support the first hypothesis with the magnitude and direction of vessel trait shifts being strongly trait, species, and city dependent. Some species did exhibit smaller vessels that were more frequent in street sites, but in some cases, we observed the opposite trend (i.e. larger vessels that were less frequent in street sites), and in other cases only vessel diameter changed. While previous studies comparing trees from rural to peri-urban and urban areas showed clear trends in vessel trait composition shifts from larger and less abundant to narrower and more frequent, our results showed a general lack of effect of urban site type on vessel traits (da Silva et al., 2022; de Vasconcellos et al., 2020; Gao et al., 2023). This suggests that the broader urbanization gradient exerts a stronger influence on vessel traits than within-city variation between sites, but also that the magnitude of within-city variation itself differs among cities.

In Montreal, however, *Acer platanoides*, *Acer saccharinum* and *Ulmus pumila* street trees showed lower vessel diameter and more frequent vessels than in parks, reflecting acclimatation to water restricted conditions in street pits (Gea-Izquierdo et al., 2012; Holste et al., 2006; Plavcová & Hacke, 2012). The same pattern was previously found for *Celtis occidentalis* in Montreal (Rissanen et al., 2025). We also observed narrower vessels for *Gleditsia triacanthos*, without a change in vessel frequency. This implies that although experiencing drier conditions that favor safety, the water supply may be enough to sustain growth without additional redundancy in xylem transport or that restricting vessel diameter is safe enough.

Fraxinus pennsylvanica did not show any discrepancy between park and street trees, a result similar to that observed for a related species, *Fraxinus ornus*, that also showed constant xylem architecture under both dry and wet sites in natural conditions in Italy (Kiorapostolou & Petit, 2019). This suggests that a shift in other functional traits may compensate for drought related stress and underline that vessel size and abundance alone do not completely determine drought tolerance. Other vessel related traits such as pit characteristics can influence vulnerability to cavitation. For instance, smaller pit pores or thicker pit

membranes can reduce the likelihood of air bubbles spreading between vessels (Jansen et al., 2009; Plavcová et al., 2011).

The species specific responses we observed are akin to those obtained in a Chinese city by Li et al (2020) who showed that some species displayed both lower vessel diameter and frequency in street trees in comparison to park trees, while other species only altered a single trait or none.

Only a few species showed differential hydraulic conductivity between sites, indicating that adjustments in traits maintained similar hydraulic conductivity (e.g. *Ulmus pumila* reduced diameter with an increase in vessel frequency that could offer more redundancy but also balance hydraulic conductivity).

2.4.3 Urban context differences

Our results do not support the second hypothesis that a climate gradient of city aridity would be a driver of hydraulic trait response in common city trees. Instead, trees in a few cities such as Montreal and Quebec City showed differences in traits between sites while others such as in Winnipeg, located in a more arid region, consistently had no differences in evaluated traits between sites and species. In some cases, e.g. *Ulmus americana* in Halifax and *Ulmus pumila* in Edmonton, which are at opposite ends of the aridity gradient, conductivity was higher in street trees, contrary to our predictions. This suggests that there may be other factors at play than regional climate, such that differences in street trees and park trees were more important in Montreal. Indeed, street trees in Montreal are typically confined to narrow planting pits and surrounded by higher proportions of impervious surfaces. In contrast, street trees in the other cities grow in vegetated strips along roads, which likely allows for greater water infiltration, and are more akin to grass covered parks (Figure A2). These differences in pit design and surface cover may explain why site-type contrasts were strongest in Montreal.

This is also reflected in the predicted mean vessel diameter that was lower in Montreal street trees than in the other cities' street trees, suggesting greater water restriction (Table B2). Previous research has shown higher levels of drought stress in trees growing under largely paved urban surfaces in comparison to those growing under unpaved sites, with a marked increase in vapor pressure deficit in paved areas (Savi et al., 2014), and that vessel diameter reduction scaled with the severity of drought stress (Awad et al., 2010). Urban form (building height and density) may also contribute as Montreal was ranked 2nd in Canada for density, likely increasing heat accumulation in built areas than less dense cities such as Edmonton

(ranked 35th) (Luan and Fuller, 2022; Han et al., 2021). Martinez-Villa et al., (2024) reported temperatures differences across downtown Montreal of up to 3.4 °C, leading to species specific adjustments in leaf traits.

For park trees, mean vessel diameter varied between cities but was not consistently largest in the wetter cities or smallest in the driest (Table B2) , suggesting that local site conditions strongly influence xylem anatomy even for park trees. Factors such as park size, proximity to a sports field (influencing soil compaction), tree density (competition for water), or of course proximity to the street may all play a role. Many parks in downtown areas were not, in fact, established over natural areas, but rather landfills covered with a shallow layer of arable soil (personal communication, city of Montreal), former quarries and other industrial lots (Richmond et al., 2025).

2.4.4 Climate effect

Spring conditions (aridity, temperature) were the dominant predictors in our models. This aligns with the critical role of this period for cambial reactivation and earlywood vessel differentiation (Begum et al., 2013; Rossi et al., 2007; Schmitt et al., 2004). Some species, such as *Fraxinus pennsylvanica*, increased vessel diameter with increased precipitation, consistent with studies where water stress promotes narrower vessels (Schuldt et al., 2016; Tardif & Conciatori, 2006). *Gleditsia triacanthos* showed lower vessel frequency following low previous summer precipitation. Lag effects from previous year drought may constrain the following spring's vessel development through depleted carbohydrate reserves (Fonti & García-González, 2004; Kormann et al., 2024).

Fraxinus pennsylvanica increased vessel frequency and hydraulic conductivity with spring aridity. Vessel redundancy may maintain hydraulic transport capacity if individual vessels are constrained by drought risk (Ewers et al., 2007). *Acer platanoides* decreased vessel frequency but did not adjust its vessel diameter under arid spring conditions, which was reflected in a lower hydraulic conductivity. This contrasts with previous findings in diffuse porous species where drier years were associated with higher vessel frequency (Zimmermann et al., 2021).

2.4.5 Tradeoffs in vessel traits

Correlations between vessel diameter and vessel frequency were generally weaker in street trees compared to park trees, suggesting that street trees may experience additional stressors (besides drought) that influence vessel development. For instance, urban trees may be subject to mechanical damage from

pruning, vandalism, traffic related shocks, as well as exposure to pollutants from cars (Zehetner et al., 2009). We also did not find a species for which only vessel frequency increased, without a corresponding change in vessel diameter. These results also suggest other vessel traits such as vessel grouping may be involved in redundancy. Greater vessel grouping may provide alternate pathways for water when a vessel is embolized (Baas et al., 1983; Tyree et al., 1994), increasing hydraulic safety (Lemaire et al., 2021; Mrad et al., 2025).

2.4.6 Study limitations

In all of our models, most of the total variance (R^2 conditional) was explained by the random factor, tree identity. This suggests that individual level variation and microsite conditions strongly affect vessel traits. Although not on the same trees, Rissanen et al., 2025b quantified sap flow for the same two *Acer* spp we sampled, also in Montreal. Their study found consistent variations in sap flow between urban and park trees, but also a strong tree-to-tree variation, indicating highly heterogenous microsite conditions.

Besides drought, other abiotic and biotic factors that were not considered in this study may affect vessel traits such as soil pollution (Christoforidis et al., 2009; Omores et al., 2017), artificial light at night (Kumar et al., 2024; Piccolo et al., 2023), vandalism, root severance (North et al., 2017) and insect damage (Clark and Kjelgren, 1990; Cregg, 1995).

Our study focused on mature trees without any visible signs of stress, and that were common both in street and park settings. This suggests that the chosen species tolerate well both growing conditions and our findings may not capture the responses exhibited by less tolerant species or younger trees. Finally, for ring-porous species, we looked only at earlywood vessel traits. This may have limited our ability to detect climate and site effects, as latewood can show responses occurring later in the season.

2.5 Conclusion

Our study looked at how urban growing site type and climate influence xylem vessel traits in common North American urban trees. While street trees were predicted to exhibit smaller vessels and higher vessel frequency than park trees due to greater drought stress, our results show that these patterns were not consistent across species or cities. Instead, vessel traits were largely species and city specific, with significant site type differences emerging primarily in Montreal and Halifax. Some species did follow our hypothesis in Montreal such as *Acer platanoides* and *Ulmus pumila* which both showed smaller vessel

diameter and increased vessel frequency in street trees. In some cities, trends were sometimes contrary to expectations, with street trees exhibiting larger vessels than park trees, although this was not always significant.

Local site conditions, such as impervious surface cover density or park size are also possibly impacting xylem anatomy. These findings highlight the complexity of urban tree hydraulic acclimation, where city design, soil properties, and local management may override broad climatic patterns.

Overall, our study underscores that single city studies may not accurately capture the full range of urban tree hydraulic responses, particularly when extrapolating findings to less dense cities. Multiple city approaches are essential for understanding species-specific acclimation strategies and for guiding urban forestry practices aimed at sustaining tree health and ecosystem services. Further studies could investigate how this plasticity translates to ecosystem provision, as certain species showed lower theoretical hydraulic conductivity, some services such as transpiration may be compromised.

Funding

We acknowledge the financial support of the [Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada](#) through grants ACCPJ 536064 – 18 and ALLRP 571966 – 22 to AP.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les mécanismes biologiques déterminant le succès d'implantation et de croissance des arbres dans le paysage urbain restent assez méconnus. Si quelques études se sont penchées sur la plasticité phénotypiques de traits fonctionnels entre les environnements urbains et périphériques, peu d'études ont analysé la variation de traits dans l'hétérogénéité d'un même paysage urbain.

L'objectif principal de ce mémoire était d'évaluer la plasticité des traits de vaisseau de xylème pour plusieurs espèces tolérantes aux conditions de croissance en ville, entre deux types de site de croissance: les rues et les parcs. L'objectif secondaire était de déterminer si les tendances observées étaient similaires d'une ville à l'autre, en analysant des arbres de cinq villes canadiennes différentes, suivant un gradient d'aridité. La première hypothèse émise était que les arbres de rue auraient tendance à montrer des traits reflétant une plus faible conductivité et une meilleure sécurité hydraulique, étant donné les conditions plus sèches et chaudes en rue qu'en parc, c'est-à-dire un diamètre de vaisseau plus faible, mais une fréquence de vaisseaux plus importante. La seconde hypothèse était que l'écart entre traits de vaisseaux entre les arbres de rue et de parc serait plus prononcé dans les villes plus arides étant donné la moindre disponibilité en eau accentuée par les contraintes de rue.

En quantifiant et comparant la moyenne de ces traits (diamètre, fréquence, conductivité hydraulique théorique) entre les arbres de rue et de parc, pour plusieurs villes, la présente étude a montré que certaines espèces montrent une plasticité au niveau des traits de vaisseau, mais aussi que les tendances observées ne sont pas constantes d'une espèce et d'une ville à l'autre sauf pour les espèces ne montrant pas de plasticité (*Quercus macrocarpa* et *Fraxinus pennsylvanica*). Pour les autres espèces, la sensibilité des traits était variable d'une espèce à l'autre. Aussi, la direction de la réponse était dépendante de la ville. En effet, pour la ville de Montréal, quatre des cinq espèces étudiées montraient une tendance qui suivait l'hypothèse de départ, que les arbres de rue montreraient des traits associés à une conductivité hydraulique plus faible. Dans les autres villes étudiées, il n'y avait que très peu de différences observées entre les rues et les parcs, sauf pour *Ulmus americana* à Halifax qui montraient des traits reflétant une plus importante conductivité hydraulique en rue plutôt qu'en parc, ce qui est contraire à l'hypothèse qui avait été émise. De plus, même si les différences n'étaient pas significatives, certaines espèces (*Ulmus pumila* à Edmonton et Winnipeg, *Acer saccharinum* à Edmonton) montraient aussi des tendances contraires à l'hypothèse de départ. Ces résultats témoignent que l'écart et la direction de la différenciation des traits varient d'une ville à l'autre. Ceci suggère que l'écart écologique entre les sites de rue et de parc n'est pas

constant parmi toutes les villes et serait plus important dans les villes où les arbres de rue poussent en fosse plutôt qu'en bande gazonnée, où le niveau d'imperméabilité du sol est le plus élevé. Toutefois, des différences importantes existent également entre les parcs, et elles peuvent être influencées par des facteurs tels que la taille du parc ou la proximité de l'arbre à la rue (en bordure vs au milieu du parc). Finalement, les résultats obtenus témoignent d'une grande variabilité de ces traits à l'échelle individuelle qui peut être attribué à la génétique, mais aussi aux conditions locales de microsite.

Limites et perspectives

Étant donné que cette recherche était surtout exploratoire, et visait à comparer deux des types de site de croissance principaux retrouvés en ville, en catégorie très générale, plusieurs variables n'ont pas été prises en compte. Une étude plus poussée pourrait mesurer certaines caractéristiques de l'environnement autour de chacun des arbres échantillonnés, comme un indice de forme urbaine tel le « urban sky factor », ou le type d'occupation du sol, ce qui peut influencer le niveau d'activité à proximité de l'arbre et ainsi le taux de compaction du sol. Par exemple, les arbres de rue situés dans des zones commerciales sont probablement soumis à une activité humaine plus importante que ceux des quartiers résidentiels (Nowak et al., 2004). Il serait également pertinent d'examiner si la plasticité observée au niveau des vaisseaux se manifeste dans d'autres types de cellules du xylème, tels que les fibres qui influencent à la densité du bois et à sa résistance mécanique.

Finalement, il ne faut pas oublier que les espèces étudiées figurent parmi les plus tolérantes au stress urbain. Si même elles montrent des ajustements significatifs de leurs traits de vaisseaux, cela suggère que les conditions de croissance peuvent être limitantes pour de nombreuses autres espèces. Ces observations soulignent l'importance de réfléchir à des stratégies pour améliorer les conditions de croissance des arbres et les services qu'ils fournissent, que ce soit par la conception des fosses de plantation ou l'augmentation des surfaces perméables.

ANNEXE A.

MÉTHODES DU CHAPITRE II.

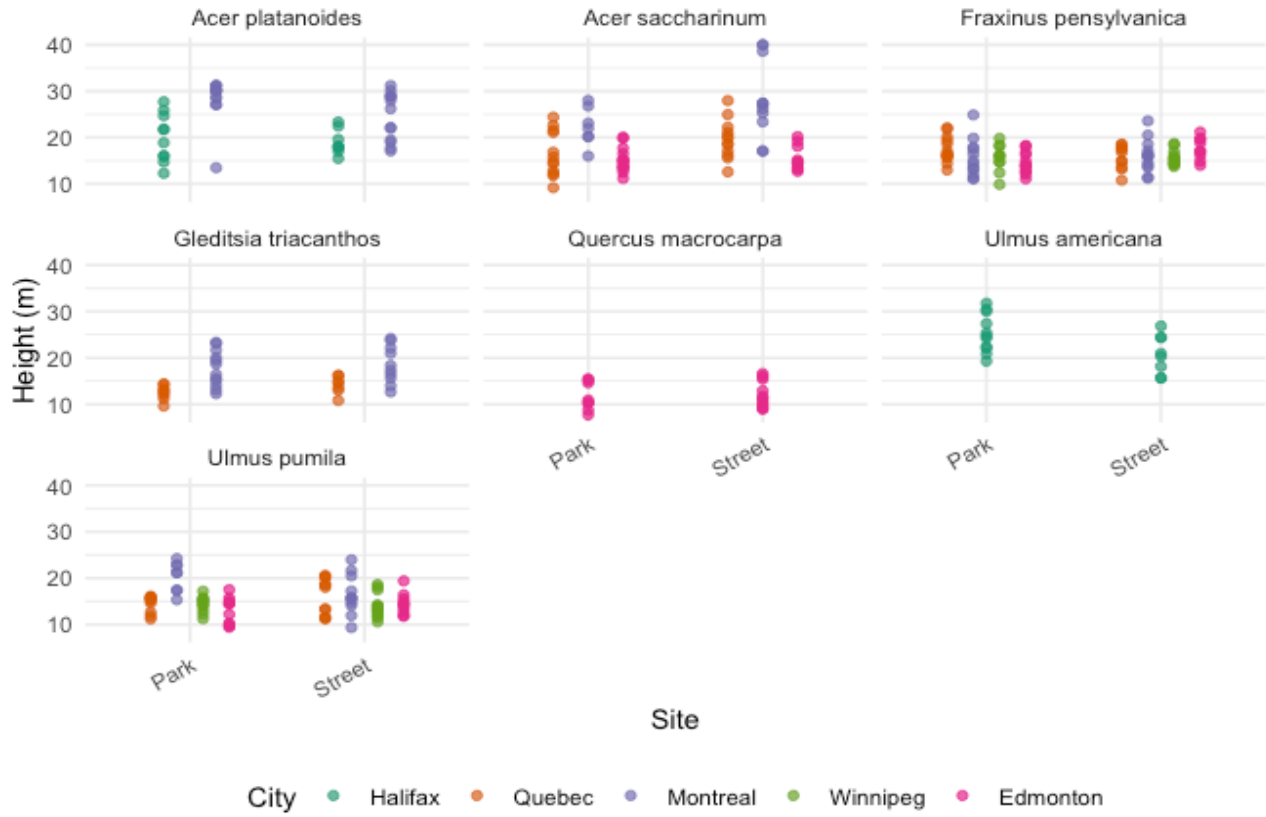


Figure A1 Tree height (m) across species, site types and cities



Figure A2 Example of sampled site types, park on the left, street on the right. A: Halifax B: Quebec C: Montreal D: Winnipeg E: Edmonton. Images taken from Google Street View.

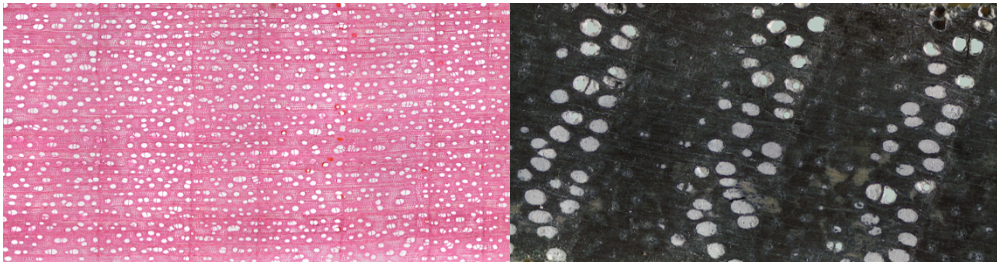


Figure A3 Example of images used for vessel measurements. To the left: Acer saccharinum prepared using the Micro method. To the right: Fraxinus pennsylvanica prepared using the Stereo method.

Table A1 Sampling year per species, city and site type.

Species	Abbreviation	Woodtype	Halifax		Montreal		Quebec		Winnipeg		Edmonton	
			Street	Park	Street	Park	Street	Park	Street	Park	Street	Park
<i>Acer platanoides</i>	AcPl	Diffuse porous	2021	2021	2017	2017						
<i>Acer saccharinum</i>	AcSa	Diffuse porous			2017	2017	2021	2021			2021	2021
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	FrPe	Ring porous			2021	2021	2021	2021	2022	2022	2021	2021
<i>Gleditsia triacanthos</i>	GITr	Ring porous			2021	2021	2021	2021				
<i>Quercus macrocarpa</i>	QuMa	Ring porous									2021	2021
<i>Ulmus pumila</i>	UIPu	Ring porous			2021	2021	2021	2021	2022	2022	2021	2021
<i>Ulmus americana</i>	UIAm	Ring porous	2021	2021								

Table A2 Model structure for each species and trait. HMI: Heat moisture index, higher value indicates more arid conditions..

Species	Dependent variable (Vessel trait)	Fixed effects		Random effects
		Climate variable		
<i>Acer platanoides</i>	VD	Site * City	Growing season precipitation	Tree identity Year
<i>Acer saccharinum</i>		Site * City + Height	Growing season precipitation	
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>		Site * City	Previous summer precipitation	
<i>Ulmus pumila</i>		Site * City	Spring temperature	
<i>Gleditsia triacanthos</i>		Site * City	Spring temperature	
<i>Ulmus americana</i>		Site	Spring temperature	
<i>Quercus macrocarpa</i>		Site	Previous growing season HMI	
<i>Acer platanoides</i>		VF	Site * City	
<i>Acer saccharinum</i>	Site * City + Height		Spring HMI	
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	Site * City		Spring HMI	
<i>Ulmus pumila</i>	Site * City		Spring temperature	
<i>Gleditsia triacanthos</i>	Site * City		Previous summer precipitation	
<i>Ulmus americana</i>	Site		Spring temperature	
<i>Quercus macrocarpa</i>	Site		Spring HMI	
<i>Acer platanoides</i>	Kh		Site * City	Spring HMI
<i>Acer saccharinum</i>		Site * City + Height	Spring HMI	
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>		Site * City	Spring HMI	
<i>Ulmus pumila</i>		Site * City	Spring temperature	
<i>Gleditsia triacanthos</i>		Site * City	Spring HMI	
<i>Ulmus americana</i>		Site	Spring temperature	
<i>Quercus macrocarpa</i>		Site	Spring HMI	

ANNEXE B.

RÉSULTATS ADDITIONNELS DU CHAPITRE II.

Table B1 Tukey's pairwise tests from linear mixed-effect models analyzing the effect of site type on vessel diameter (VD), vessel frequency (VF) and theoretical hydraulic conductivity (Kh). The estimate corresponds to the delta between park and street predicted mean value, with positive values indicating higher mean values in park. Standards errors (SE) and p-value are provided for each contrast.

Trait	Species	City	Comparison	Estimate	SE	p.value
VD	AcPl	Montreal	Park - Street	0.008077	0.001778	0.000518***
	AcPl	Halifax	Park - Street	-0.00289	0.002097	0.175411
	AcSa	Edmonton	Park - Street	-0.00265	0.002178	0.227904
	AcSa	Montreal	Park - Street	0.007435	0.002686	0.007503**
	AcSa	Quebec	Park - Street	0.004213	0.002197	0.059988
	FrPe	Edmonton	Park - Street	-0.00073	0.006825	0.915589
	FrPe	Montreal	Park - Street	0.004092	0.006204	0.511343
	FrPe	Quebec	Park - Street	0.006504	0.00652	0.321406
	FrPe	Winnipeg	Park - Street	-0.00587	0.006631	0.378361
	GITr	Montreal	Park - Street	0.011617	0.004891	0.023508
	GITr	Quebec	Park - Street	0.002038	0.005908	0.732311
	UIPu	Edmonton	Park - Street	-0.01885	0.008865	0.03668*
	UIPu	Montreal	Park - Street	0.02143	0.009784	0.031573*
	UIPu	Quebec	Park - Street	-0.00479	0.008841	0.589688
UIPu	Winnipeg	Park - Street	-0.00712	0.008291	0.39311	
VF	AcPl	Montreal	Park - Street	-8.47492	3.358669	0.015774*
	AcPl	Halifax	Park - Street	-6.07268	3.957119	0.133063
	AcSa	Edmonton	Park - Street	-0.20377	3.986852	0.95941
	AcSa	Montreal	Park - Street	-6.55562	4.693641	0.167548
	AcSa	Quebec	Park - Street	-8.53849	3.942782	0.034342*
	FrPe	Edmonton	Park - Street	0.563002	0.709585	0.429799
	FrPe	Montreal	Park - Street	-0.74899	0.64489	0.248796
	FrPe	Quebec	Park - Street	-1.45149	0.677738	0.035146*
	FrPe	Winnipeg	Park - Street	1.070241	0.689334	0.124334
	GITr	Montreal	Park - Street	-1.09292	0.560165	0.059577
	GITr	Quebec	Park - Street	-0.35339	0.676667	0.604986
	UIPu	Edmonton	Park - Street	2.599184	1.084292	0.018964*
	UIPu	Montreal	Park - Street	-2.2163	1.196655	0.067908
	UIPu	Quebec	Park - Street	1.512567	1.081304	0.165942
UIPu	Winnipeg	Park - Street	0.940641	1.014096	0.356575	
Kh	AcPl	Montreal	Park - Street	0.00028	9.19E-05	0.004178**
	AcPl	Halifax	Park - Street	-0.00022	0.000108	0.050832
	AcSa	Edmonton	Park - Street	-0.00025	0.00016	0.124435
	AcSa	Montreal	Park - Street	0.000338	0.000198	0.092679

AcSa	Quebec	Park - Street	0.000278	0.000162	0.091209
FrPe	Edmonton	Park - Street	0.000438	0.002216	0.843956
FrPe	Montreal	Park - Street	0.00055	0.002014	0.785318
FrPe	Quebec	Park - Street	-0.0004	0.002117	0.852139
FrPe	Winnipeg	Park - Street	-0.00099	0.002153	0.647279
UIPu	Edmonton	Park - Street	-0.00793	0.003235	0.016564*
UIPu	Montreal	Park - Street	0.006305	0.003567	0.081163
UIPu	Quebec	Park - Street	-0.00166	0.003223	0.607334
UIPu	Winnipeg	Park - Street	0.000642	0.003023	0.832506

Table B2 Tukey's pairwise tests from linear mixed-effect models analyzing the effect of city on vessel diameter (VD) and vessel frequency (VF) within each site type. The estimate column corresponds to the delta between the two contrasted cities, with positive values indicating higher mean values in the first city relative to the second. Standards errors (SE) and p-value are provided for each contrast.

	Trait	Species	Comparison	Site type	Estimate	SE	p.value
VD		AcPl	Halifax - Montreal	Park	6.62547	4.96880	0.19101
		AcPl	Halifax - Montreal	Street	6.44786	6.27618	0.31130
		AcSa	Edmonton - Montreal	Park	6.25395	6.84673	0.63425
		AcSa	Edmonton - Montreal	Street	5.21134	6.78571	0.72410
		AcSa	Edmonton - Quebec	Park	0.71233	5.49623	0.99078
		AcSa	Edmonton - Quebec	Street	0.77068	5.72866	0.99007
		AcSa	Montreal - Quebec	Park	-5.54162	6.01011	0.62885
		AcSa	Montreal - Quebec	Street	-4.44066	5.49329	0.69949
		FrPe	Edmonton - Montreal	Park	0.45008	0.74415	0.93024
		FrPe	Edmonton - Montreal	Street	-1.00664	0.83111	0.62174
		FrPe	Edmonton - Quebec	Park	1.08850	0.76849	0.49321
		FrPe	Edmonton - Quebec	Street	-0.70948	0.86621	0.84528
		FrPe	Edmonton - Winnipeg	Park	-1.59795	0.77007	0.17072
		FrPe	Edmonton - Winnipeg	Street	-1.20668	0.84143	0.48238
		FrPe	Montreal - Quebec	Park	0.63842	0.72154	0.81273
		FrPe	Montreal - Quebec	Street	0.29716	0.70774	0.97492
		FrPe	Montreal - Winnipeg	Park	-2.04802	0.72322	0.02965 *
		FrPe	Montreal - Winnipeg	Street	-0.20004	0.67719	0.99096
		FrPe	Quebec - Winnipeg	Park	-2.68645	0.74824	0.00323
		FrPe	Quebec - Winnipeg	Street	-0.49720	0.71983	0.90034
		GITr	Montreal - Quebec	Park	-0.22667	1.34401	0.86724
		GITr	Montreal - Quebec	Street	1.70497	0.91209	0.07171
		UIPu	Edmonton - Montreal	Park	5.10960	2.51794	0.18749
		UIPu	Edmonton - Montreal	Street	-4.31049	1.11329	0.00137 **
		UIPu	Edmonton - Quebec	Park	1.43867	1.24523	0.65677
		UIPu	Edmonton - Quebec	Street	1.18342	1.09511	0.70245
		UIPu	Edmonton - Winnipeg	Park	2.49515	1.23207	0.18896

	UIPu	Edmonton - Winnipeg	Street	2.15439	1.09094	0.20764
	UIPu	Montreal - Quebec	Park	-3.67093	2.47848	0.45439
	UIPu	Montreal - Quebec	Street	5.49390	1.06467	0.00001 ***
	UIPu	Montreal - Winnipeg	Park	-2.61446	2.47190	0.71620
	UIPu	Montreal - Winnipeg	Street	6.46488	1.06040	0.00000 ***
	UIPu	Quebec - Winnipeg	Park	1.05647	1.14928	0.79466
	UIPu	Quebec - Winnipeg	Street	0.97097	1.04130	0.78755
VF	AcPl	Halifax - Montreal	Park	6.62547	4.96880	0.19101
	AcPl	Halifax - Montreal	Street	6.44786	6.27618	0.31130
	AcSa	Edmonton - Montreal	Park	6.25395	6.84673	0.63425
	AcSa	Edmonton - Montreal	Street	5.21134	6.78571	0.72410
	AcSa	Edmonton - Quebec	Park	0.71233	5.49623	0.99078
	AcSa	Edmonton - Quebec	Street	0.77068	5.72866	0.99007
	AcSa	Montreal - Quebec	Park	-5.54162	6.01011	0.62885
	AcSa	Montreal - Quebec	Street	-4.44066	5.49329	0.69949
	FrPe	Edmonton - Montreal	Park	0.45008	0.74415	0.93024
	FrPe	Edmonton - Montreal	Street	-1.00664	0.83111	0.62174
	FrPe	Edmonton - Quebec	Park	1.08850	0.76849	0.49321
	FrPe	Edmonton - Quebec	Street	-0.70948	0.86621	0.84528
	FrPe	Edmonton - Winnipeg	Park	-1.59795	0.77007	0.17072
	FrPe	Edmonton - Winnipeg	Street	-1.20668	0.84143	0.48238
	FrPe	Montreal - Quebec	Park	0.63842	0.72154	0.81273
	FrPe	Montreal - Quebec	Street	0.29716	0.70774	0.97492
	FrPe	Montreal - Winnipeg	Park	-2.04802	0.72322	0.02965 *
	FrPe	Montreal - Winnipeg	Street	-0.20004	0.67719	0.99096
	FrPe	Quebec - Winnipeg	Park	-2.68645	0.74824	0.00323
	FrPe	Quebec - Winnipeg	Street	-0.49720	0.71983	0.90034
	GITr	Montreal - Quebec	Park	-0.22667	1.34401	0.86724
	GITr	Montreal - Quebec	Street	1.70497	0.91209	0.07171
	UIPu	Edmonton - Montreal	Park	5.10960	2.51794	0.18749
	UIPu	Edmonton - Montreal	Street	-4.31049	1.11329	0.00137 **
	UIPu	Edmonton - Quebec	Park	1.43867	1.24523	0.65677
	UIPu	Edmonton - Quebec	Street	1.18342	1.09511	0.70245
	UIPu	Edmonton - Winnipeg	Park	2.49515	1.23207	0.18896
	UIPu	Edmonton - Winnipeg	Street	2.15439	1.09094	0.20764
	UIPu	Montreal - Quebec	Park	-3.67093	2.47848	0.45439
	UIPu	Montreal - Quebec	Street	5.49390	1.06467	0.00001 ***
	UIPu	Montreal - Winnipeg	Park	-2.61446	2.47190	0.71620
	UIPu	Montreal - Winnipeg	Street	6.46488	1.06040	0.00000 ***
	UIPu	Quebec - Winnipeg	Park	1.05647	1.14928	0.79466
	UIPu	Quebec - Winnipeg	Street	0.97097	1.04130	0.78755

RÉFÉRENCES

- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), 95–111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Alon, A., Ginzburg, N., Zemach, H., Voet, H., Cohen, S., & David-Schwartz, R. (2024). Growing at the arid edge: Anatomical variations in leaves are more extensive than in stems of five Mediterranean species across contrasting moisture regimes. *American Journal of Botany*, 111(10), e16407. <https://doi.org/10.1002/ajb2.16407>
- Aloni, R. (1995). The Induction of Vascular Tissues by Auxin and Cytokinin. In P. J. Davies (Ed.), *Plant Hormones* (pp. 531–546). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0473-9_25
- Aloni, R., & Zimmermann, M. H. (1983). The control of vessel size and density along the plant axis. *Differentiation*, 24(1–3), 203–208. <https://doi.org/10.1111/j.1432-0436.1983.tb01320.x>
- Andrade, M. T., Oliveira, L. A., Pereira, T. S., Cardoso, A. A., Batista-Silva, W., DaMatta, F. M., Zsögön, A., & Martins, S. C. V. (2022). Impaired auxin signaling increases vein and stomatal density but reduces hydraulic efficiency and ultimately net photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 73(12), 4147–4156. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac119>
- Armenakis, C., & Nirupama, N. (2014). Urban impacts of ice storms: Toronto December 2013. *Natural Hazards*, 74(2), 1291–1298. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1211-7>
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3), 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2013). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), 282–286. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.04.001>
- Arnič, D., Gričar, J., Jevšenak, J., Božič, G., Von Arx, G., & Prislán, P. (2021). Different Wood Anatomical and Growth Responses in European Beech (*Fagus sylvatica* L.) at Three Forest Sites in Slovenia. *Frontiers in Plant Science*, 12, 669229. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.669229>
- Arx, G. V., Kueffer, C., & Fonti, P. (2013). Quantifying plasticity in vessel grouping – added value from the image analysis tool ROXAS. *IAWA Journal*, 34(4), 433–445. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000035>
- Awad, H., Barigah, T., Badel, E., Cochard, H., & Herbette, S. (2010). Poplar vulnerability to xylem cavitation acclimates to drier soil conditions. *Physiologia Plantarum*. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2010.01367.x>
- Baas, P., & Wheeler, E. A. (2011). Wood anatomy and climate change. In J. A. N. Parnell, M. B. Jones, S. Waldren, & T. R. Hodgkinson (Eds.), *Climate Change, Ecology and Systematics* (pp. 141–155). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974540.007>
- Bailey, I. W. (1953). Evolution Of The Tracheary Tissue Of Land Plants. *American Journal of Botany*, 40(1), 4–8. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1953.tb06441.x>

- Bailey, I. W. (1920). The Cambium And Its Derivative Tissues li. Size Variations Of Cambial Initials In Gymnosperms And Angiosperms. *American Journal of Botany*, 7(9), 355–367. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1920.tb05590.x>
- Bailey, I. W., & Tupper, W. W. (1918). Size Variation in Tracheary Cells: I. A Comparison between the Secondary Xylems of Vascular Cryptogams, Gymnosperms and Angiosperms. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 54(2), 149. <https://doi.org/10.2307/20025747>
- Barbaroux, C., & Breda, N. (2002). Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology*, 22(17), 1201–1210. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.17.1201>
- [Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. \(2015\). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67\(1\). https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01)
- Becker, P., Gribben, R. J., & Lim, C. M. (2000). Tapered conduits can buffer hydraulic conductance from path-length effects. *Tree Physiology*, 20(14), 965–967. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.14.965>
- Begum, S., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Oribe, Y., & Funada, R. (2013). Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: Understanding the role of temperature in wood formation of trees. *Physiologia Plantarum*, 147(1), 46–54. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01663.x>
- Bijoor, N. S., McCarthy, H. R., Zhang, D., & Pataki, D. E. (2012). Water sources of urban trees in the Los Angeles metropolitan area. *Urban Ecosystems*, 15(1), 195–214. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0196-1>
- Borghetti, M., Gentilesca, T., Leonardi, S., Van Noije, T., & Rita, A. (2016). Long-term temporal relationships between environmental conditions and xylem functional traits: A meta-analysis across a range of woody species along climatic and nitrogen deposition gradients. *Tree Physiology*, treephys;tpw087v1. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw087>
- Brodersen, C. R., McElrone, A. J., Choat, B., Lee, E. F., Shackel, K. A., & Matthews, M. A. (2013). In Vivo Visualizations of Drought-Induced Embolism Spread in *Vitis vinifera*. *Plant Physiology*, 161(4), 1820–1829. <https://doi.org/10.1104/pp.112.212712>
- Brodribb, T. J., & Feild, T. S. (2000). Stem hydraulic supply is linked to leaf photosynthetic capacity: Evidence from New Caledonian and Tasmanian rainforests. *Plant, Cell & Environment*, 23(12), 1381–1388. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00647.x>
- Bucci, S. J., Scholz, F. G., Goldstein, G., Meinzer, F. C., & Sternberg, L. D. S. L. (2003). Dynamic changes in hydraulic conductivity in petioles of two savanna tree species: Factors and mechanisms contributing to the refilling of embolized vessels. *Plant, Cell & Environment*, 26(10), 1633–1645. <https://doi.org/10.1046/j.0140-7791.2003.01082.x>
- Bush, E., & Lemmen, D. S. (2019). Canada's changing climate report
- Buttò, V., Rossi, S., Deslauriers, A., & Morin, H. (2019). Is size an issue of time? Relationship between the duration of xylem development and cell traits. *Annals of Botany*, 123(7), 1257–1265. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz032>
- Campelo, F., Nabais, C., Gutiérrez, E., Freitas, H., & García-González, I. (2010). Vessel features of *Quercus ilex* L. growing under Mediterranean climate have a better climatic signal than tree-ring width. *Trees*, 24(3), 463–470. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0414-0>

- Cariñanos, P., Calaza-Martínez, P., O'Brien, L., & Calfapietra, C. (2017). The Cost of Greening: Disservices of Urban Trees. In D. Pearlmutter, C. Calfapietra, R. Samson, L. O'Brien, S. Krajter Ostoić, G. Sanesi, & R. Alonso Del Amo (Eds.), *The Urban Forest* (Vol. 7, pp. 79–87). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50280-9_9
- Carlquist, S. (1984). Vessel Grouping in Dicotyledon Wood. *Aliso*, 10(4), 505–525. <https://doi.org/10.5642/aliso.19841004.03>
- Carol-Aristizabal, M., Dupras, J., Messier, C., & Sousa-Silva, R. (2023). Which Tree Species Best Withstand Urban Stressors? Ask the Experts. *Arboriculture & Urban Forestry*, jauf.2023.026. <https://doi.org/10.48044/jauf.2023.026>
- Carrer, M., Von Arx, G., Castagneri, D., & Petit, G. (2015). Distilling allometric and environmental information from time series of conduit size: The standardization issue and its relationship to tree hydraulic architecture. *Tree Physiology*, 35(1), 27–33. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu108>
- Castagneri, D., Carrer, M., Regev, L., & Boaretto, E. (2020). Precipitation variability differently affects radial growth, xylem traits and ring porosity of three Mediterranean oak species at xeric and mesic sites. *Science of The Total Environment*, 699, 134285. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134285>
- Castagneri, D., Regev, L., Boaretto, E., & Carrer, M. (2017). Xylem anatomical traits reveal different strategies of two Mediterranean oaks to cope with drought and warming. *Environmental and Experimental Botany*, 133, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.10.009>
- Catesson, A.-M. (1994, May). Cambial Ultrastructure and Biochemistry: Changes in Relation to Vascular Tissue Differentiation and the Seasonal Cycle. *International Journal of Plant Sciences*, 251–261.
- Cekstere, G., Nikodemus, O., & Osvalde, A. (2008). Toxic impact of the de-icing material to street greenery in Riga, Latvia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 7(3), 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2008.02.004>
- Celestian, S. B., & Martin, C. A. (2004). *RHIZOSPHERE, SURFACE, AND AIR TEMPERATURE PATTERNS AT PARKING LOTS IN PHOENIX, ARIZONA, U.S.*
- Center For International Earth Science Information Network-CIESIN-Columbia University. (2017). *Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density, Revision 11* (Version 4.11) [Dataset]. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <https://doi.org/10.7927/H49C6VHW>
- Center For International Earth Science Information Network-CIESIN-Columbia University. (2018). *Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Count, Revision 11* [Dataset]. [object Object]. <https://doi.org/10.7927/H4JW8BX5>
- Chen, D., Wang, X., Khoo, Y. B., Thatcher, M., Lin, B. B., Ren, Z., Wang, C.-H., & Barnett, G. (2013). Assessment of Urban Heat Island and Mitigation by Urban Green Coverage. In A. Khare & T. Beckman (Eds.), *Mitigating Climate Change* (pp. 247–257). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37030-4_13
- Chitra-Tarak, R., Xu, C., Aguilar, S., Anderson-Teixeira, K. J., Chambers, J., Detto, M., Faybishenko, B., Fisher, R. A., Knox, R. G., Koven, C. D., Kueppers, L. M., Kunert, N., Kupers, S. J., McDowell, N. G., Newman, B. D., Paton, S. R., Pérez, R., Ruiz, L., Sack, L., ... McMahon, S. M. (2021). Hydraulically-vulnerable trees survive on deep-water access during droughts in a tropical forest. *New Phytologist*, 231(5), 1798–1813. <https://doi.org/10.1111/nph.17464>

- Choat, B., Ball, M., Luly, J., & Holtum, J. (2003). Pit Membrane Porosity and Water Stress-Induced Cavitation in Four Co-Existing Dry Rainforest Tree Species. *Plant Physiology*, 131(1), 41–48. <https://doi.org/10.1104/pp.014100>
- Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., & Medlyn, B. E. (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 558(7711), 531–539. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0240-x>
- Choat, B., Cobb, A. R., & Jansen, S. (2008). Structure and function of bordered pits: New discoveries and impacts on whole-plant hydraulic function. *New Phytologist*, 177(3), 608–626. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02317.x>
- Christoforidis, A., & Stamatis, N. (2009). Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national road in Kavala's region, Greece. *Geoderma*, 151(3–4), 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.016>
- Clark, J., & Kjelgren, R. (1990). Water as a Limiting Factor in the Development of Urban Trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 16(8), 203–208. <https://doi.org/10.48044/jauf.1990.047>
- Cochard, H., & Tyree, M. T. (1990). Xylem dysfunction in Quercus: Vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. *Tree Physiology*, 6(4), 393–407. <https://doi.org/10.1093/treephys/6.4.393>
- Conway, T. M., & Vander Vecht, J. (2015). Growing a diverse urban forest: Species selection decisions by practitioners planting and supplying trees. *Landscape and Urban Planning*, 138, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.01.007>
- Cregg, B., & Dix, M. (2001). Tree Moisture Stress and Insect Damage in Urban Areas in Relation to Heat Island Effects. *Arboriculture & Urban Forestry*, 27(1), 8–17. <https://doi.org/10.48044/jauf.2001.002>
- Cunningham, M. A., Snyder, E., Yonkin, D., Ross, M., & Elsen, T. (2008). Accumulation of deicing salts in soils in an urban environment. *Urban Ecosystems*, 11(1), 17–31. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0031-x>
- Czaja, M., Kołton, A., & Muras, P. (2020). The Complex Issue of Urban Trees—Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities. *Forests*, 11(9), 932. <https://doi.org/10.3390/f11090932>
- Da Silva, D. B., De Vasconcellos, T. J., & Callado, C. H. (2023). Effects of urbanization on the wood anatomy of Guarea guidonia, an evergreen species of the Atlantic Forest. *Trees*, 37(1), 99–110. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02080-w>
- Dai, Y., Wang, L., & Wan, X. (2020). Frost fatigue and its spring recovery of xylem conduits in ring-porous, diffuse-porous, and coniferous species in situ. *Plant Physiology and Biochemistry*, 146, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.11.014>
- Davis, S. D., Sperry, J. S., & Hacke, U. G. (1999). The relationship between xylem conduit diameter and cavitation caused by freezing. *American Journal of Botany*, 86(10), 1367–1372. <https://doi.org/10.2307/2656919>
- Day, S., & Bassuk, N. (1994). A Review of the Effects of Soil Compaction and Amelioration Treatments on Landscape Trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 20(1), 9–17. <https://doi.org/10.48044/jauf.1994.003>
- Day, S., Wiseman, P. E., Dickinson, S., & Harris, J. R. (2010). Tree Root Ecology in the Urban Environment and Implications for a Sustainable Rhizosphere. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(5), 193–205. <https://doi.org/10.48044/jauf.2010.026>

- De Vasconcellos, T. J., & Callado, C. H. (2020). Wood anatomy of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna under urban pollution. *IAWA Journal*, 41(1), 30–47. <https://doi.org/10.1163/22941932-00002109>
- Diaconu, D., Hackenberg, J., Stangler, D. F., Kahle, H.-P., & Spiecker, H. (2017). Simulation study to determine necessary sample sizes for image analysis-based quantitative wood anatomy of vessels of beech (*Fagus sylvatica*). *Dendrochronologia*, 45, 35–38. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.07.002>
- Dixon, H. H. (1914). *Transpiration and the ascent of sap in plants*. Macmillan.
- Dobbs, C., Kendal, D., & Nitschke, C. R. (2014). Multiple ecosystem services and disservices of the urban forest establishing their connections with landscape structure and sociodemographics. *Ecological Indicators*, 43, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.007>
- Doll, D., Ching, J. K. S., & Kaneshiro, J. (1985). Parameterization of subsurface heating for soil and concrete using net radiation data. *Boundary-Layer Meteorology*, 32(4), 351–372. <https://doi.org/10.1007/BF00122000>
- Dória, L. C. (n.d.). *PhD thesis at the University of Leiden, The Netherlands*.
- Ellmore, G. S., & Ewers, F. W. (1985). Hydraulic Conductivity in Trunk Xylem of Elm, *Ulmus Americana*. *IAWA Journal*, 6(4), 303–307. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000958>
- Elsadek, M., Liu, B., Lian, Z., & Xie, J. (2019). The influence of urban roadside trees and their physical environment on stress relief measures: A field experiment in Shanghai. *Urban Forestry & Urban Greening*, 42, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.05.007>
- Environment and Climate Change Canada. (2024). *Code of Practice for the Environmental Management of Road Salts Annual Overview of Data Reported (2019-2022) in the Context of National Targets* (p. 28). publications.gc.ca/pub?id=9.810093&sl=0
- Enquist, B. J. (2002). Universal scaling in tree and vascular plant allometry: Toward a general quantitative theory linking plant form and function from cells to ecosystems. *Tree Physiology*, 22(15–16), 1045–1064. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.15-16.1045>
- Equiza, M. A., Calvo-Polanco, M., Cirelli, D., Señorans, J., Wartenbe, M., Saunders, C., & Zwiazek, J. J. (2017). Long-term impact of road salt (NaCl) on soil and urban trees in Edmonton, Canada. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.11.003>
- Esau, K., & Evert, R. F. (2006). *Esau's Plant Anatomy: Meristems, Cells, and Tissues of the Plant Body: Their Structure, Function, and Development* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Essiamah, Sam., & Eschrich, W. (1985). Changes of Starch Content in the Storage Tissues of Deciduous Trees During Winter and Spring. *IAWA Journal*, 6(2), 97–106. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000921>
- Ewers, B. E., Mackay, D. S., & Samanta, S. (2007). Interannual consistency in canopy stomatal conductance control of leaf water potential across seven tree species. *Tree Physiology*, 27(1), 11–24. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.1.11>
- Ewers, F. W., Ewers, J. M., Jacobsen, A. L., & López-Portillo, J. (2007). Vessel Redundancy: Modeling Safety In Numbers. *IAWA Journal*, 28(4), 373–388. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001650>

- Fan, Z., Zhang, S., Hao, G., Ferry Slik, J. W., & Cao, K. (2012). Hydraulic conductivity traits predict growth rates and adult stature of 40 Asian tropical tree species better than wood density. *Journal of Ecology*, *100*(3), 732–741. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01939.x>
- Fini, A., Frangi, P., Comin, S., Vigevani, I., Rettori, A. A., Brunetti, C., Moura, B. B., & Ferrini, F. (2022). Effects of pavements on established urban trees: Growth, physiology, ecosystem services and disservices. *Landscape and Urban Planning*, *226*, 104501. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104501>
- Fisher, J. B., Goldstein, G., Jones, T. J., & Cordell, S. (2007). Wood vessel diameter is related to elevation and genotype in the Hawaiian tree *Metrosideros polymorpha* (Myrtaceae). *American Journal of Botany*, *94*(5), 709–715. <https://doi.org/10.3732/ajb.94.5.709>
- Fontes, C. G., Pinto-Ledezma, J., Jacobsen, A. L., Pratt, R. B., & Cavender-Bares, J. (2022). Adaptive variation among oaks in wood anatomical properties is shaped by climate of origin and shows limited plasticity across environments. *Functional Ecology*, *36*(2), 326–340. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13964>
- Fonti, P., Eilmann, B., García-González, I., & von Arx, G. (2009). Expeditious building of ring-porous earlywood vessel chronologies without losing signal information. *Trees*, *23*(3), 665–671. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0310-z>
- Fonti, P., & García-González, I. (2004). Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. *New Phytologist*, *163*(1), 77–86. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01089.x>
- Fonti, P., Solomonoff, N., & García-González, I. (2007). Earlywood vessels of *Castanea sativa* record temperature before their formation. *New Phytologist*, *173*(3), 562–570. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01945.x>
- Fonti, P., Von Arx, G., García-González, I., Eilmann, B., Sass-Klaassen, U., Gärtner, H., & Eckstein, D. (2010). Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist*, *185*(1), 42–53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03030.x>
- Frazer, L. (2005). Paving Paradise: The Peril of Impervious Surfaces. *Environmental Health Perspectives*, *113*(7). <https://doi.org/10.1289/ehp.113-a456>
- Fromm, J. (2013). Xylem Development in Trees: From Cambial Divisions to Mature Wood Cells. In J. Fromm (Ed.), *Cellular Aspects of Wood Formation* (Vol. 20, pp. 3–39). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36491-4_1
- Galiano, L., Martínez-Vilalta, J., & Lloret, F. (2011). Carbon reserves and canopy defoliation determine the recovery of Scots pine 4 yr after a drought episode. *New Phytologist*, *190*(3), 750–759. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03628.x>
- Gamble, J. L., Hurley, B. J., Schultz, P. A., Jaglom, W. S., Krishnan, N., & Harris, M. (2013). Climate Change and Older Americans: State of the Science. *Environmental Health Perspectives*, *121*(1), 15–22. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205223>
- Gao, X., Zhao, B., Chen, Z., Song, W., Li, Z., & Wang, X. (2023). The Impact of Urbanization on Tree Growth and Xylem Anatomical Characteristics. *Biology*, *12*(11), 1373. <https://doi.org/10.3390/biology12111373>
- García-Cervigón, A. I., Fajardo, A., Caetano-Sánchez, C., Camarero, J. J., & Olano, J. M. (2020). Xylem anatomy needs to change, so that conductivity can stay the same: Xylem adjustments across elevation and latitude in *Nothofagus pumilio*. *Annals of Botany*, *125*(7), 1101–1112. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa042>

- García-González, I., & Fonti, P. (2006). Selecting earlywood vessels to maximize their environmental signal. *Tree Physiology*, 26(10), 1289–1296. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.10.1289>
- García-González, I., Souto-Herrero, M., & Campelo, F. (2016). RING-POROSITY AND EARLYWOOD VESSELS: A REVIEW ON EXTRACTING ENVIRONMENTAL INFORMATION THROUGH TIME. *IAWA Journal*, 37(2), 295–314. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160135>
- Gärtner, H., Cherubini, P., Fonti, P., Von Arx, G., Schneider, L., Nievergelt, D., Verstege, A., Bast, A., Schweingruber, F. H., & Büntgen, U. (2015). A Technical Perspective in Modern Tree-ring Research—How to Overcome Dendroecological and Wood Anatomical Challenges. *Journal of Visualized Experiments*, 97, 52337. <https://doi.org/10.3791/52337>
- Gea-Izquierdo, G., Fonti, P., Cherubini, P., Martín-Benito, D., Chaar, H., & Canellas, I. (2012). Xylem hydraulic adjustment and growth response of *Quercus canariensis* Willd. To climatic variability. *Tree Physiology*, 32(4), 401–413. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps026>
- George, K., Ziska, L. H., Bunce, J. A., & Quebedeaux, B. (2007). Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban–rural transect. *Atmospheric Environment*, 41(35), 7654–7665. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.018>
- Giagli, K., Gričar, J., Vavrčík, H., Menšík, L., & Gryc, V. (2016). THE EFFECTS OF DROUGHT ON WOOD FORMATION IN *FAGUS SYLVATICA* DURING TWO CONTRASTING YEARS. *IAWA Journal*, 37(2), 332–348. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160137>
- Gilbert, S. F., & Gilbert, S. F. (2000). *Developmental Biology* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Gillerot, L., Landuyt, D., De Frenne, P., Muys, B., & Verheyen, K. (2024). Urban tree canopies drive human heat stress mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 92, 128192. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128192>
- Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., & Roloff, A. (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*, 143, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.005>
- Gil-Pelegrín, E., Corcuera, L., & Camarero, J. J. (2004). Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. *Trees - Structure and Function*, 18(1), 83–92. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0284-9>
- Gleason, S. M., Westoby, M., Jansen, S., Choat, B., Hacke, U. G., Pratt, R. B., Bhaskar, R., Brodribb, T. J., Bucci, S. J., Cao, K., Cochard, H., Delzon, S., Domec, J., Fan, Z., Feild, T. S., Jacobsen, A. L., Johnson, D. M., Lens, F., Maherali, H., ... Zanne, A. E. (2016). Weak tradeoff between xylem safety and xylem-specific hydraulic efficiency across the world's woody plant species. *New Phytologist*, 209(1), 123–136. <https://doi.org/10.1111/nph.13646>
- Gomulkiewicz, R., & Stinchcombe, J. R. (2022). Phenotypic plasticity made simple, but not too simple. *American Journal of Botany*, 109(10), 1519–1524. <https://doi.org/10.1002/ajb2.16068>
- Gonzalez, I. G., & Eckstein, D. (2003). Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology*, 23(7), 497–504. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.7.497>
- Gortan, E., Nardini, A., Gasco, A., & Salleo, S. (2009). The hydraulic conductance of *Fraxinus ornus* leaves is constrained by soil water availability and coordinated with gas exchange rates. *Tree Physiology*, 29(4), 529–539. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpn053>

- Gouveia, A. C., & Freitas, H. (2009). Modulation of leaf attributes and water use efficiency in *Quercus suber* along a rainfall gradient. *Trees*, 23(2), 267–275. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0274-z>
- Government of Canada, S. C. (2022, February 9). *The Daily—Canada’s large urban centres continue to grow and spread*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220209/dq220209b-eng.htm>
- Graves, W. R., & Dana, M. N. (1987). Root-zone Temperature Monitored at Urban Sites. *HortScience*, 22(4), 613–614. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.22.4.613>
- Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., Gomez-Baggethun, E., Gren, Å., Hamstead, Z., Hansen, R., Kabisch, N., Kremer, P., Langemeyer, J., Rall, E. L., McPhearson, T., Pauleit, S., Qureshi, S., Schwarz, N., Voigt, A., ... Elmqvist, T. (2014). A Quantitative Review of Urban Ecosystem Service Assessments: Concepts, Models, and Implementation. *AMBIO*, 43(4), 413–433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>
- Hacke, U. G., Sperry, J. S., Wheeler, J. K., & Castro, L. (2006). Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency. *Tree Physiology*, 26(6), 689–701. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.6.689>
- Hacke, U. G., Spicer, R., Schreiber, S. G., & Plavcová, L. (2017). An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. *Plant, Cell & Environment*, 40(6), 831–845. <https://doi.org/10.1111/pce.12777>
- Hacke, U., & Sauter, J. J. (1996). Xylem dysfunction during winter and recovery of hydraulic conductivity in diffuse-porous and ring-porous trees. *Oecologia*, 105(4), 435–439. <https://doi.org/10.1007/BF00330005>
- Hacke, U. G., & Sperry, J. S. (2001). Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 4(2), 97–115. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00017>
- Hall, S. J., Learned, J., Ruddell, B., Larson, K. L., Cavender-Bares, J., Bettez, N., Groffman, P. M., Grove, J. M., Heffernan, J. B., Hobbie, S. E., Morse, J. L., Neill, C., Nelson, K. C., O’Neil-Dunne, J. P. M., Ogden, L., Pataki, D. E., Pearse, W. D., Polsky, C., Chowdhury, R. R., ... Trammell, T. L. E. (2016). Convergence of microclimate in residential landscapes across diverse cities in the United States. *Landscape Ecology*, 31(1), 101–117. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0297-y>
- Han, L., Heblich, S., Timmins, C., & Zylberberg, Y. (2024). *Cool cities: The value of urban trees* (w32063; p. w32063). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w32063>
- Heynen, N. C., & Lindsey, G. (2003). Correlates of Urban Forest Canopy Cover: Implications for Local Public Works. *Public Works Management & Policy*, 8(1), 33–47. <https://doi.org/10.1177/1087724X03008001004>
- Hodkinson, T. R., Jones, M. B., Waldren, S., & Parnell, J. A. N. (2011). *Climate Change, Ecology and Systematics*. Cambridge University Press.
- Hofman, J., Trávníčková, E., & Anděl, P. (2012). Road salts effects on soil chemical and microbial properties at grassland and forest site in protected natural areas. *Plant, Soil and Environment*, 58(6), 282–288. <https://doi.org/10.17221/5994-PSE>
- Hogg, E. H. (1997). Temporal scaling of moisture and the forest-grassland boundary in western Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84(1–2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(96\)02380-5](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(96)02380-5)

- Holste, E. K., Jerke, M. J., & Matzner, S. L. (2006). Long-term acclimatization of hydraulic properties, xylem conduit size, wall strength and cavitation resistance in *Phaseolus vulgaris* in response to different environmental effects. *Plant, Cell & Environment*, 29(5), 836–843. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01454.x>
- Hsieh, C.-M., Li, J.-J., Zhang, L., & Schwegler, B. (2018). Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Buildings*, 159, 382–397. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.045>
- Huang, G., Zhou, W., & Cadenasso, M. L. (2011). Is everyone hot in the city? Spatial pattern of land surface temperatures, land cover and neighborhood socioeconomic characteristics in Baltimore, MD. *Journal of Environmental Management*, 92(7), 1753–1759. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.02.006>
- Islam, M., Rahman, M., & Bräuning, A. (2019). Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*. *Dendrochronologia*, 53, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.11.007>
- Jacobsen, A. L., & Pratt, R. B. (2023). Vessel diameter polymorphism determines vulnerability-to-embolism curve shape. *IAWA Journal*, 44(3–4), 320–334. <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10115>
- Jacobsen, A. L., Valdovinos-Ayala, J., & Pratt, R. B. (2018). Functional lifespans of xylem vessels: Development, hydraulic function, and post-function of vessels in several species of woody plants. *American Journal of Botany*, 105(2), 142–150. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1029>
- Jansen, S., Choat, B., & Pletsers, A. (2009). Morphological variation of intervessel pit membranes and implications to xylem function in angiosperms. *American Journal of Botany*, 96(2), 409–419. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800248>
- Janz, D., Lautner, S., Wildhagen, H., Behnke, K., Schnitzler, J., Rennenberg, H., Fromm, J., & Polle, A. (2012). Salt stress induces the formation of a novel type of ‘pressure wood’ in two *Populus* species. *New Phytologist*, 194(1), 129–141. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03975.x>
- Jenerette, G. D., Harlan, S. L., Buyantuev, A., Stefanov, W. L., Delet-Barreto, J., Ruddell, B. L., Myint, S. W., Kaplan, S., & Li, X. (2016). Micro-scale urban surface temperatures are related to land-cover features and residential heat related health impacts in Phoenix, AZ USA. *Landscape Ecology*, 31(4), 745–760. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0284-3>
- Jim, C. Y. (2019). Soil volume restrictions and urban soil design for trees in confined planting sites. *Journal of Landscape Architecture*, 14(1), 84–91. <https://doi.org/10.1080/18626033.2019.1623552>
- Jin, M., Dickinson, R. E., & Zhang, D. (2005). The Footprint of Urban Areas on Global Climate as Characterized by MODIS. *Journal of Climate*, 18(10), 1551–1565. <https://doi.org/10.1175/JCLI3334.1>
- Johnson, K. M., Brodersen, C., Carins-Murphy, M. R., Choat, B., & Brodribb, T. J. (2020). Xylem Embolism Spreads by Single-Conduit Events in Three Dry Forest Angiosperm Stems. *Plant Physiology*, 184(1), 212–222. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00464>
- Junghans, U., Polle, A., DÜchting, P., Weiler, E., Kuhlman, B., Gruber, F., & Teichmann, T. (2006). Adaptation to high salinity in poplar involves changes in xylem anatomy and auxin physiology. *Plant, Cell & Environment*, 29(8), 1519–1531. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01529.x>
- Kamaluddin, M., & Zwiazek, J. J. (2004). Effects of root medium pH on water transport in paper birch (*Betula papyrifera*) seedlings in relation to root temperature and abscisic acid treatments. *Tree Physiology*, 24(10), 1173–1180. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.10.1173>

- Kargar, K., & Joksimovic, D. (2024). Analysis of sewer blockage causes using open data. *Water Practice & Technology*, 19(9), 3855–3866. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.218>
- Kiorapostolou, N., & Petit, G. (2019). Similarities and differences in the balances between leaf, xylem and phloem structures in *Fraxinus ornus* along an environmental gradient. *Tree Physiology*, 39(2), 234–242. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy095>
- Koeser, A., Hauer, R., Norris, K., & Krouse, R. (2013). Factors influencing long-term street tree survival in Milwaukee, WI, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(4), 562–568. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.05.006>
- Kormann, J. M., Van Der Maaten-Theunissen, M., Unterholzner, L., Liesebach, M., Liepe, K. J., & Van Der Maaten, E. (2024). Variation in vessel traits of northern red oak (*Quercus rubra* L.) provenances revealed high phenotypic plasticity to prevailing environmental conditions. *Trees*, 38(5), 1283–1295. <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02557-y>
- Kostić, S., Čukanović, J., Ljubojević, M., Hiel, K., & Mladenović, E. (2019). Influence of an Urban Paved Environment on Tree Dimensions and Vitality Characteristics: A Case Study of Sycamore Maple (*Acer pseudoplatanus* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(6), 4247–4255. <https://doi.org/10.15244/pjoes/97355>
- Kozłowski, T. T. (1992). Carbohydrate sources and sinks in woody plants. *The Botanical Review*, 58(2), 107–222. <https://doi.org/10.1007/BF02858600>
- Kozłowski, T. T., & Winget, C. H. (1963). Patterns of Water Movement in Forest Trees. *Botanical Gazette*, 124(4), 301–311. <https://doi.org/10.1086/336210>
- Kudo, K., Yasue, K., Hosoo, Y., & Funada, R. (2015). Relationship between formation of earlywood vessels and leaf phenology in two ring-porous hardwoods, *Quercus serrata* and *Robinia pseudoacacia*, in early spring. *Journal of Wood Science*, 61(5), 455–464. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1487-6>
- Kumar, A., & Singh, H. (2024). Consequences of Artificial Light at Night (ALAN) on Urban Tree Functioning: A Case Study. In H. Singh (Ed.), *Urban Forests, Climate Change and Environmental Pollution* (pp. 653–673). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67837-0_31
- Kuliczewska, E., & Parka, A. (2017). Management of risk of tree and shrub root intrusion into sewers. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.11.001>
- Kuo, F. E., & Sullivan, W. C. (2001). Environment and Crime in the Inner City: Does Vegetation Reduce Crime? *Environment and Behavior*, 33(3), 343–367. <https://doi.org/10.1177/0013916501333002>
- Lahr, E. (2018). *Red Maple Photosynthesis* [Text/xml]. KNB Data Repository. <https://doi.org/10.5063/F19S1P7Z>
- Lemaire, C., Quilichini, Y., Brunel-Michac, N., Santini, J., Berti, L., Cartailier, J., Conchon, P., Badel, É., & Herbette, S. (2021). Plasticity of the xylem vulnerability to embolism in *Populus tremula x alba* relies on pit quantity properties rather than on pit structure. *Tree Physiology*, 41(8), 1384–1399. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab018>
- Lemmen, D. S. (n.d.). *Canada's Changing Climate Report*.

- Leng, H., Lu, M., & Wan, X. (2013). Variation in embolism occurrence and repair along the stem in drought-stressed and re-watered seedlings of a poplar clone. *Physiologia Plantarum*, 147(3), 329–339. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01665.x>
- Li, M., Dong, H., Li, J., Dai, X., Lin, J., Li, S., Zhou, C., Chiang, V. L., & Li, W. (2023). PtrVCS2 Regulates Drought Resistance by Changing Vessel Morphology and Stomatal Closure in *Populus trichocarpa*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 4458. <https://doi.org/10.3390/ijms24054458>
- Li, Y., Ling, L., Xia, D., Ji, Y., Wang, J., Li, C., Meng, Y., Fang, X., & Chen, Y. (2020). A Comparative Study on Phenotypic Plasticity of Seven Urban Street Tree Species in Two Contrasting Environments. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(1), 739–750. <https://doi.org/10.15244/pjoes/122613>
- Litvak, E., McCarthy, H. R., & Pataki, D. E. (2012). Transpiration sensitivity of urban trees in a semi-arid climate is constrained by xylem vulnerability to cavitation. *Tree Physiology*, 32(4), 373–388. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps015>
- Lloret, F., Siscart, D., & Dalmases, C. (2004). Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain). *Global Change Biology*, 10(12), 2092–2099. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00870.x>
- Lloyd, J., Syvertsen, J., & Kriedemann, P. (1987). Salinity Effects of Leaf Water Relations and Gas Exchange of “Valencia” Orange, *Citrus sinensis* (L.) Osbeck, on Rootstocks With Different Salt Exclusion Characteristics. *Functional Plant Biology*, 14(6), 605. <https://doi.org/10.1071/PP9870605>
- Lo Piccolo, E., Lauria, G., Guidi, L., Remorini, D., Massai, R., & Landi, M. (2023). Shedding light on the effects of LED streetlamps on trees in urban areas: Friends or foes? *Science of The Total Environment*, 865, 161200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161200>
- Lobo, A., Torres-Ruiz, J. M., Burlett, R., Lemaire, C., Parise, C., Francioni, C., Truffaut, L., Tomášková, I., Hansen, J. K., Kjær, E. D., Kremer, A., & Delzon, S. (2018). Assessing inter- and intraspecific variability of xylem vulnerability to embolism in oaks. *Forest Ecology and Management*, 424, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.031>
- Lotfiomran, N., Fromm, J., & Luinstra, G. A. (2015). Effects of elevated CO₂ and different nutrient supplies on wood structure of European beech (*Fagus sylvatica*) and gray poplar (*Populus × canescens*). *IAWA Journal*, 36(1), 84–97. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000087>
- Luan, H., & Fuller, D. (2022). Urban form in Canada at a small-area level: Quantifying “compactness” and “sprawl” with bayesian multivariate spatial factor analysis. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(4), 1300–1313. <https://doi.org/10.1177/23998083211062901>
- Lundmark, A., & Olofsson, B. (2007). Chloride Deposition and Distribution in Soils Along a Deiced Highway – Assessment Using Different Methods of Measurement. *Water, Air, and Soil Pollution*, 182(1–4), 173–185. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9330-8>
- Lyytimäki, J., & Sipilä, M. (2009). Hopping on one leg – The challenge of ecosystem disservices for urban green management. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8(4), 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.09.003>
- Mansell, M. G. (2003). *Rural and Urban Hydrology*. Thomas Telford.

- Martínez-Vilalta, J., Mencuccini, M., Álvarez, X., Camacho, J., Loepfe, L., & Piñol, J. (2012). Spatial distribution and packing of xylem conduits. *American Journal of Botany*, 99(7), 1189–1196. <https://doi.org/10.3732/ajb.1100384>
- Martinez Villa, J. A. (2024). Plant community responses to climate change, urbanization and biogeographic differences.
- Matisons, R., & Brūmelis, G. (2012). Influence of climate on tree-ring and earlywood vessel formation in *Quercus robur* in Latvia. *Trees*, 26(4), 1251–1266. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0701-z>
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yezzer, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- Mclean, E. H., Prober, S. M., Stock, W. D., Steane, D. A., Potts, B. M., Vaillancourt, R. E., & Byrne, M. (2014). Plasticity of functional traits varies clinally along a rainfall gradient in *Eucalyptus tricarpa*. *Plant, Cell & Environment*, 37(6), 1440–1451. <https://doi.org/10.1111/pce.12251>
- Mencuccini, M. (2003). The ecological significance of long-distance water transport: Short-term regulation, long-term acclimation and the hydraulic costs of stature across plant life forms. *Plant, Cell & Environment*, 26(1), 163–182. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.00991.x>
- Millward, A. A., Paudel, K., & Briggs, S. E. (2011). Naturalization as a strategy for improving soil physical characteristics in a forested urban park. *Urban Ecosystems*, 14(2), 261–278. <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0153-4>
- Morris, K. I., Chan, A., Morris, K. J. K., Ooi, M. C. G., Oozer, M. Y., Abakr, Y. A., Nadzir, M. S. M., Mohammed, I. Y., & Al-Qrimli, H. F. (2017). Impact of urbanization level on the interactions of urban area, the urban climate, and human thermal comfort. *Applied Geography*, 79, 50–72. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.12.007>
- Mrad, A., Johnson, D. M., Love, D. M., & Domec, J. (2021). The roles of conduit redundancy and connectivity in xylem hydraulic functions. *New Phytologist*, 231(3), 996–1007. <https://doi.org/10.1111/nph.17429>
- Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 134, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.013>
- Nicotra, A. B., Atkin, O. K., Bonser, S. P., Davidson, A. M., Finnegan, E. J., Mathesius, U., Poot, P., Purugganan, M. D., Richards, C. L., Valladares, F., & Van Kleunen, M. (2010). Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in Plant Science*, 15(12), 684–692. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.008>
- Nielsen, C., Bühler, O., & Kristoffersen, P. (2007). Soil Water Dynamics and Growth of Street and Park Trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(4), 231–245. <https://doi.org/10.48044/jauf.2007.027>
- Nilsson, K., Randrup, T. B., & Wandall, B. L. M. (2001). Trees in the Urban Environment: Some Practical Considerations. In J. Evans (Ed.), *The Forests Handbook, Volume 2* (pp. 260–271). Blackwell Science Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470757079.ch12>
- Nilsson, K., & Sangster, M. (Eds.). (2011). *Forests, Trees and Human Health*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9806-1>

- Nobel, P. S. (1999). *Physicochemical & Environmental Plant Physiology*. Academic Press.
- North, E. A., D'Amato, A. W., Russell, M. B., & Johnson, G. R. (2017). The influence of sidewalk replacement on urban street tree growth. *Urban Forestry & Urban Greening*, 24, 116–124.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.029>
- Nowak, D. J. (2012). Contrasting natural regeneration and tree planting in fourteen North American cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(4), 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.02.005>
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., & Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 40–48.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.019>
- Nowak, D. J., Kuroda, M., & Crane, D. E. (2004). Tree mortality rates and tree population projections in Baltimore, Maryland, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2(3), 139–147. <https://doi.org/10.1078/1618-8667-00030>
- Nowak, D. J., McBride, J. R., & Beatty, R. A. (1990). Newly planted street tree growth and mortality. *Journal of Arboriculture*, 124–130.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–24.
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- Olsen, J. T., Caudle, K. L., Johnson, L. C., Baer, S. G., & Maricle, B. R. (2013). Environmental and genetic variation in leaf anatomy among populations of *Andropogon gerardii* (Poaceae) along a precipitation gradient. *American Journal of Botany*, 100(10), 1957–1968. <https://doi.org/10.3732/ajb.1200628>
- Olson, M. E., Anfodillo, T., Rosell, J. A., Petit, G., Crivellaro, A., Isnard, S., León-Gómez, C., Alvarado-Cárdenas, L. O., & Castorena, M. (2014). Universal hydraulics of the flowering plants: Vessel diameter scales with stem length across angiosperm lineages, habits and climates. *Ecology Letters*, 17(8), 988–997.
<https://doi.org/10.1111/ele.12302>
- Olson, M. E., & Rosell, J. A. (2013). Vessel diameter–stem diameter scaling across woody angiosperms and the ecological causes of xylem vessel diameter variation. *New Phytologist*, 197(4), 1204–1213.
<https://doi.org/10.1111/nph.12097>
- Olson, M. E., Anfodillo, T., Gleason, S. M., & McCulloh, K. A. (2021). Tip-to-base xylem conduit widening as an adaptation: Causes, consequences, and empirical priorities. *New Phytologist*, 229(4), 1877–1893.
<https://doi.org/10.1111/nph.16961>
- Omores, R. A., Wewers, F., Ikhide, P. O., Farrar, T., & Giwa, A. (2017). Spatio–Temporal Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Soils in Cape Town, South Africa. *International Journal of Environmental Research*, 11(2), 189–196. <https://doi.org/10.1007/s41742-017-0018-2>
- Östberg, J., Martinsson, M., Stål, Ö., & Fransson, A.-M. (2012). Risk of root intrusion by tree and shrub species into sewer pipes in Swedish urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(1), 65–71.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.11.001>

- Pérez-de-Lis, G., Rossi, S., Vázquez-Ruiz, R. A., Rozas, V., & García-González, I. (2016). Do changes in spring phenology affect earlywood vessels? Perspective from the xylogenesis monitoring of two sympatric ring-porous oaks. *New Phytologist*, 209(2), 521–530. <https://doi.org/10.1111/nph.13610>
- Pérez-de-Lis, G., Olano, J. M., Rozas, V., Rossi, S., Vázquez-Ruiz, R. A., & García-González, I. (2017). Environmental conditions and vascular cambium regulate carbon allocation to xylem growth in deciduous oaks. *Functional Ecology*, 31(3), 592–603. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12789>
- Perrot-Rechenmann, C. (2010). Cellular Responses to Auxin: Division versus Expansion. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(5), a001446–a001446. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a001446>
- Peters, E. B., McFadden, J. P., & Montgomery, R. A. (2010). Biological and environmental controls on tree transpiration in a suburban landscape. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G4), 2009JG001266. <https://doi.org/10.1029/2009JG001266>
- Pittermann, J. (2010). The evolution of water transport in plants: An integrated approach. *Geobiology*, 8(2), 112–139. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2010.00232.x>
- Phipps, R. (1985). *Collecting, preparing, crossdating, and measuring tree increment cores*. <https://doi.org/10.3133/wri854148>
- Plavcová, L., & Hacke, U. G. (2012). Phenotypic and developmental plasticity of xylem in hybrid poplar saplings subjected to experimental drought, nitrogen fertilization, and shading. *Journal of Experimental Botany*, 63(18), 6481–6491. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers303>
- Plavcová, L., Hacke, U. G., & Sperry, J. S. (2011). Linking irradiance-induced changes in pit membrane ultrastructure with xylem vulnerability to cavitation. *Plant, Cell & Environment*, 34(3), 501–513. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02258.x>
- Poorter, L., McDonald, I., Alarcón, A., Fichtler, E., Licona, J.-C., Peña-Claros, M., Sterck, F., Villegas, Z., & Sass-Klaassen, U. (2010). The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist*, 185(2), 481–492. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092.x>
- Pratt, R. B., & Jacobsen, A. L. (2017). Conflicting demands on angiosperm xylem: Tradeoffs among storage, transport and biomechanics. *Plant, Cell & Environment*, 40(6), 897–913. <https://doi.org/10.1111/pce.12862>
- Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Schütze, G., Perkins, D., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., Con, T. V., Chavanne, A., Toit, B. D., Foster, K., & Lefer, B. (2017). Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14831-w>
- Pritzkow, C., Williamson, V., Szota, C., Trouvé, R., & Arndt, S. K. (2020). Phenotypic plasticity and genetic adaptation of functional traits influences intra-specific variation in hydraulic efficiency and safety. *Tree Physiology*, 40(2), 215–229. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz121>
- Rahman, M. A., Moser, A., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2019). Comparing the transpirational and shading effects of two contrasting urban tree species. *Urban Ecosystems*, 22(4), 683–697. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00853-x>
- Randrup, T. (2000). OCCURRENCE OF TREE ROOTS IN DANISH MUNICIPAL SEWER SYSTEMS. *Arboricultural Journal*, 24(4), 283–306. <https://doi.org/10.1080/03071375.2000.9747282>

- Ren, Z., Zhao, H., Fu, Y., Xiao, L., & Dong, Y. (2022). Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: A case study in Changchun city, China. *Journal of Forestry Research*, 33(3), 911–922. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01361-5>
- Richmond, I. C., Paulauskas, M. A., Padvauskas, E., González Sinisterra, L. C., Hutt-Taylor, K., Robitaille, A. L., & Ziter, C. D. (2025). Land-use history causes differences in park nighttime cooling capacity and forest structure. *Ecological Applications*, 35(5), e70082. <https://doi.org/10.1002/eap.70082>
- Ridgers, D., Rolf, K., & Stål, Ö. (2006). MANAGEMENT AND PLANNING SOLUTIONS TO LACK OF RESISTANCE TO ROOT PENETRATION BY MODERN PVC AND CONCRETE SEWER PIPES. *Arboricultural Journal*, 29(4), 269–290. <https://doi.org/10.1080/03071375.2006.9747467>
- Rissanen, K., Lapa, G., Houle, D., Kneeshaw, D., & Paquette, A. (2025a). Differing seasonal trends in water use and water status between park and street trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 105, 128690. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128690>
- Rissanen, K., Vitali, V., Kneeshaw, D., & Paquette, A. (2025b). Vessel anatomy of urban *Celtis occidentalis* trees varies to favour safety or efficiency depending on site conditions. *Trees*, 39(1), 29. <https://doi.org/10.1007/s00468-025-02603-3>
- Rita, A., Cherubini, P., Leonardi, S., Todaro, L., & Borghetti, M. (2015). Functional adjustments of xylem anatomy to climatic variability: Insights from long-term *Ilex aquifolium* tree-ring series. *Tree Physiology*, 35(8), 817–828. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv055>
- Rodríguez-Ramírez, E. C., Ferrero, M. E., Acevedo-Vega, I., Crispin-DelaCruz, D. B., Ticse-Otarola, G., & Requena-Rojas, E. J. (2022). Plastic adjustments in xylem vessel traits to drought events in three *Cedrela* species from Peruvian Tropical Andean forests. *Scientific Reports*, 12(1), 21112. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25645-w>
- Rodríguez-Zaccaro, F. D., Valdovinos-Ayala, J., Percolla, M. I., Venturas, M. D., Pratt, R. B., & Jacobsen, A. L. (2019). Wood structure and function change with maturity: Age of the vascular cambium is associated with xylem changes in current-year growth. *Plant, Cell & Environment*, 42(6), 1816–1831. <https://doi.org/10.1111/pce.13528>
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Parshall, L., Gaffin, S., Lynn, B., Goldberg, R., Cox, J., & Hodges, S. (2006). Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. *86th AMS Annual Meeting*.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., & Carraro, V. (2007). Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0625-7>
- Rötzer, T., Rahman, M. A., Moser-Reischl, A., Pauleit, S., & Pretzsch, H. (2019). Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of The Total Environment*, 676, 651–664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235>
- Roy, S., Byrne, J., & Pickering, C. (2012). A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(4), 351–363. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006>
- Ryan, M. G., & Yoder, B. J. (1997). Hydraulic Limits to Tree Height and Tree Growth. *BioScience*, 47(4), 235–242. <https://doi.org/10.2307/1313077>

- Sabatini, S., Beis, D., Wolkenfelt, H., Murfett, J., Guilfoyle, T., Malamy, J., Benfey, P., Leyser, O., Bechtold, N., Weisbeek, P., & Scheres, B. (1999). An Auxin-Dependent Distal Organizer of Pattern and Polarity in the Arabidopsis Root. *Cell*, 99(5), 463–472. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(00\)81535-4](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(00)81535-4)
- Sæbø, A., Benedikz, T., & Randrup, T. B. (2003). Selection of trees for urban forestry in the Nordic countries. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2(2), 101–114. <https://doi.org/10.1078/1618-8667-00027>
- Sand, E., Konarska, J., Howe, A. W., Andersson-Sköld, Y., Moldan, F., Pleijel, H., & Uddling, J. (2018a). Effects of ground surface permeability on the growth of urban linden trees. *Urban Ecosystems*, 21(4), 691–696. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0750-1>
- Sand, E., Konarska, J., Howe, A. W., Andersson-Sköld, Y., Moldan, F., Pleijel, H., & Uddling, J. (2018b). Effects of ground surface permeability on the growth of urban linden trees. *Urban Ecosystems*, 21(4), 691–696. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0750-1>
- Sass-Klaassen, U., Sabajo, C. R., & Den Ouden, J. (2011). Vessel formation in relation to leaf phenology in pedunculate oak and European ash. *Dendrochronologia*, 29(3), 171–175. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2011.01.002>
- Savage, J. A., Kiecker, T., McMann, N., Park, D., Rothendler, M., & Mosher, K. (2022). Leaf out time correlates with wood anatomy across large geographic scales and within local communities. *New Phytologist*, 235(3), 953–964. <https://doi.org/10.1111/nph.18041>
- Savi, T., Bertuzzi, S., Branca, S., Tretiach, M., & Nardini, A. (2015). Drought-induced xylem cavitation and hydraulic deterioration: Risk factors for urban trees under climate change? *New Phytologist*, 205(3), 1106–1116. <https://doi.org/10.1111/nph.13112>
- Schmitt, U., Jalkanen, R., & Eckstein, D. (2004). Cambium dynamics of *Pinus sylvestris* and *Betula* spp. in the northern boreal forests in Finland
- Schneider, C., Neuwirth, B., Schneider, S., Balanzategui, D., Elsholz, S., Fenner, D., Meier, F., & Heinrich, I. (2022). Using the dendro-climatological signal of urban trees as a measure of urbanization and urban heat island. *Urban Ecosystems*, 25(3), 849–865. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01196-2>
- Schneider, L., & Gärtner, H. (2013). The advantage of using a starch based non-Newtonian fluid to prepare micro sections. *Dendrochronologia*, 31(3), 175–178. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.04.002>
- Scholz, A., Klepsch, M., Karimi, Z., & Jansen, S. (2013). How to quantify conduits in wood? *Frontiers in Plant Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00056>
- Schreiber, S. G., Hacke, U. G., & Hamann, A. (2015). Variation of xylem vessel diameters across a climate gradient: Insight from a reciprocal transplant experiment with a widespread boreal tree. *Functional Ecology*, 29(11), 1392–1401. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12455>
- Schume, H., Grabner, M., & Eckmüllner, O. (2004). The influence of an altered groundwater regime on vessel properties of hybrid poplar. *Trees*, 18(2), 184–194. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0294-7>
- Shiflett, S. A., Liang, L. L., Crum, S. M., Feyisa, G. L., Wang, J., & Jenerette, G. D. (2017). Variation in the urban vegetation, surface temperature, air temperature nexus. *Science of The Total Environment*, 579, 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.069>

- Shu-Wen, L., Lu-Yao, T., Bo-Na, Z., Lin-Feng, Y., Jin-Lian, T., Jiang-Bo, X., Yan, L., Zhong-Yuan, W., & 1State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China 2State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China. (2025). Regional differentiation of cooperative relationships between *Ulmus pumila* branches and leaves along precipitation gradients. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 49(2), 282–294. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2024.0050>
- Sjöman, H., Hiron, A. D., & Bassuk, N. L. (2015). Urban forest resilience through tree selection—Variation in drought tolerance in *Acer*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.004>
- Skinner, A. K., Lunt, I. D., Spooner, P., & McINTYRE, S. (2009). The effect of soil compaction on germination and early growth of *Eucalyptus albens* and an exotic annual grass. *Austral Ecology*, 34(6), 698–704. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.01977.x>
- Smith, I. A., Templer, P. H., & Hutyrá, L. R. (2024). Water sources for street trees in mesic urban environments. *Science of The Total Environment*, 908, 168411. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168411>
- Song, X. P., Tan, P. Y., Edwards, P., & Richards, D. (2018). The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.017>
- Sperlich, D., Chang, C. T., Peñuelas, J., & Sabaté, S. (2019). Responses of photosynthesis and component processes to drought and temperature stress: Are Mediterranean trees fit for climate change? *Tree Physiology*, 39(11), 1783–1805. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz089>
- Sperry, J. (1993). Winter xylem embolism and spring recovery in *Betula cordifolia*, *Fagus grandifolia*, *Abies balsamea* and *Picea rubens*. In M. Borghetti, J. Grace, & A. Raschi (Eds.), *Water Transport in Plants under Climatic Stress* (1st ed., pp. 86–98). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511753305.009>
- Sperry, J. S., & Sullivan, J. E. M. (1992). Xylem Embolism in Response to Freeze-Thaw Cycles and Water Stress in Ring-Porous, Diffuse-Porous, and Conifer Species. *Plant Physiology*, 100(2), 605–613. <https://doi.org/10.1104/pp.100.2.605>
- Sperry, J. S., & Tyree, M. T. (1988). Mechanism of Water Stress-Induced Xylem Embolism. *Plant Physiology*, 88(3), 581–587. <https://doi.org/10.1104/pp.88.3.581>
- Stratópoulos, L. M. F., Zhang, C., Häberle, K.-H., Pauleit, S., Duthweiler, S., Pretzsch, H., & Rötzer, T. (2019). Effects of Drought on the Phenology, Growth, and Morphological Development of Three Urban Tree Species and Cultivars. *Sustainability*, 11(18), 5117. <https://doi.org/10.3390/su11185117>
- Suzuki, M., Yoda, K., & Suzuki, H. (1996). Phenological Comparison of the Onset of Vessel Formation Between Ring-Porous and Diffuse-Porous Deciduous Trees in a Japanese Temperate Forest. *IAWA Journal*, 17(4), 431–444. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000641>
- Svensson, M. K., & Eliasson, I. (2002). Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 61(1), 37–54. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00076-2)
- T. Roetzer, Markus Wittenzeller, Hans Haeckel & Jiri Nekovar. (n.d.). *Phenology in central Europe – differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas.*

- Takagi, M., & Gyokusen, K. (2004). Light and atmospheric pollution affect photosynthesis of street trees in urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2(3), 167–171. <https://doi.org/10.1078/1618-8667-00033>
- Takahashi, S., Okada, N., & Nobuchi, T. (2013). Relationship between the timing of vessel formation and leaf phenology in ten ring-porous and diffuse-porous deciduous tree species. *Ecological Research*, 28(4), 615–624. <https://doi.org/10.1007/s11284-013-1053-x>
- Tam, B. Y., Gough, W. A., & Mohsin, T. (2015). The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. *Urban Climate*, 12, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.12.004>
- Tams, L., Paton, E. N., & Kluge, B. (2023). Impact of shading on evapotranspiration and water stress of urban trees. *Ecohydrology*, 16(6). <https://doi.org/10.1002/eco.2556>
- Tang, C., Cobley, B. T., Mokhtara, S., Wilson, C. E., & Greenway, H. (1993). High pH in the nutrient solution impairs water uptake in *Lupinus angustifolius* L. *Plant and Soil*, 155–156(1), 517–519. <https://doi.org/10.1007/BF00025097>
- Tardif, J. C., & Conciatori, F. (2006). Influence of climate on tree rings and vessel features in red oak and white oak growing near their northern distribution limit, southwestern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(9), 2317–2330. <https://doi.org/10.1139/x06-133>
- Tng, D. Y. P., Apgaua, D. M. G., Ishida, Y. F., Mencuccini, M., Lloyd, J., Laurance, W. F., & Laurance, S. G. W. (2018). Rainforest trees respond to drought by modifying their hydraulic architecture. *Ecology and Evolution*, 8(24), 12479–12491. <https://doi.org/10.1002/ece3.4601>
- Tombesi, S., Johnson, R. S., Day, K. R., & DeJong, T. M. (2010). Relationships between xylem vessel characteristics, calculated axial hydraulic conductance and size-controlling capacity of peach rootstocks. *Annals of Botany*, 105(2), 327–331. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp281>
- Tyree, M. T., Davis, S. D., & Cochard, H. (1994). Biophysical Perspectives of Xylem Evolution: Is there a Tradeoff of Hydraulic Efficiency for Vulnerability to Dysfunction? *IAWA Journal*, 15(4), 335–360. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001369>
- Tyree, M. T., & Sperry, J. S. (1989). Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40(1), 19–36.
- Tyree, M. T., & Zimmermann, M. H. (2002). *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04931-0>
- Upmanis, H., Eliasson, I., & Lindqvist, S. (1998). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology*, 18(6), 681–700. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199805\)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199805)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L)
- Urli, M., Porte, A. J., Cochard, H., Guengant, Y., Burlett, R., & Delzon, S. (2013). Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. *Tree Physiology*, 33(7), 672–683. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt030>
- Vanden Broeck, A., Cox, K., Melosik, I., Maes, B., & Smets, K. (2018). Genetic diversity loss and homogenization in urban trees: The case of *Tilia × europaea* in Belgium and the Netherlands. *Biodiversity and Conservation*, 27(14), 3777–3792. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1628-5>

- Vitasse, Y., Bresson, C. C., Kremer, A., Michalet, R., & Delzon, S. (2010). Quantifying phenological plasticity to temperature in two temperate tree species. *Functional Ecology*, 24(6), 1211–1218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01748.x>
- Volder, A., Watson, T., & Viswanathan, B. (2009). Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8(4), 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.08.006>
- Von Allmen, E. I., Sperry, J. S., & Bush, S. E. (2015). Contrasting whole-tree water use, hydraulics, and growth in a co-dominant diffuse-porous vs. Ring-porous species pair. *Trees*, 29(3), 717–728. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1149-0>
- Von Arx, G., Crivellaro, A., Prendin, A. L., Čufar, K., & Carrer, M. (2016). Quantitative Wood Anatomy—Practical Guidelines. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00781>
- Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D., & Carroll, C. (2016). Locally Downscaled and Spatially Customizable Climate Data for Historical and Future Periods for North America. *PLOS ONE*, 11(6), e0156720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156720>
- Wang, W., Huang, J.-G., Zhang, T., Qin, L., Jiang, S., Zhou, P., Zhang, Y., & Peñuelas, J. (2023). Precipitation regulates the responses of xylem phenology of two dominant tree species to temperature in arid and semi-arid forest of the southern Altai Mountains. *Science of The Total Environment*, 886, 163951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163951>
- Watkins, R., Palmer, J., Kolokotroni, M., & Littlefair, P. (2002). The balance of the annual heating and cooling demand within the London urban heat island. *Building Services Engineering Research and Technology*, 23(4), 207–213. <https://doi.org/10.1191/0143624402bt043oa>
- Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M., & Lo, M. (2014). The Management of Tree Root Systems in Urban and Suburban Settings II: A Review of Strategies to Mitigate Human Impacts. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(5), 249–271. <https://doi.org/10.48044/jauf.2014.025>
- Weithmann, G., Paligi, S. S., Schuldt, B., & Leuschner, C. (2022). Branch xylem vascular adjustments in European beech in response to decreasing water availability across a precipitation gradient. *Tree Physiology*, tpac080. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpac080>
- Wheeler, E. A., Baas, P., & Rodgers, S. (2007). Variations In Dieot Wood Anatomy: A Global Analysis Based on the Insidewood Database. *IAWA Journal*, 28(3), 229–258. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001638>
- Whitford, V. (2001). “City form and natural process”—Indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 57(2), 91–103. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00192-X](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00192-X)
- Wolfe, B. T., Sperry, J. S., & Kursar, T. A. (2016). Does leaf shedding protect stems from cavitation during seasonal droughts? A test of the hydraulic fuse hypothesis. *New Phytologist*, 212(4), 1007–1018. <https://doi.org/10.1111/nph.14087>
- Yan, H., Wang, K., Lin, T., Zhang, G., Sun, C., Hu, X., & Ye, H. (2021). The Challenge of the Urban Compact Form: Three-Dimensional Index Construction and Urban Land Surface Temperature Impacts. *Remote Sensing*, 13(6), 1067. <https://doi.org/10.3390/rs13061067>

- Yan, H., Wu, F., & Dong, L. (2018). Influence of a large urban park on the local urban thermal environment. *Science of The Total Environment*, 622–623, 882–891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.327>
- Yang, J.-L., & Zhang, G.-L. (2011). Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *Journal of Soils and Sediments*, 11(5), 751–761. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0356-1>
- Yates, M. J., Anthony Verboom, G., Rebelo, A. G., & Cramer, M. D. (2010). Ecophysiological significance of leaf size variation in Proteaceae from the Cape Floristic Region. *Functional Ecology*, 24(3), 485–492. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01678.x>
- Zanne, A. E., Westoby, M., Falster, D. S., Ackerly, D. D., Loarie, S. R., Arnold, S. E. J., & Coomes, D. A. (2010). Angiosperm wood structure: Global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. *American Journal of Botany*, 97(2), 207–215. <https://doi.org/10.3732/ajb.0900178>
- Zhang, C., Stratópoulos, L. M. F., Xu, C., Pretzsch, H., & Rötzer, T. (2020). Development of Fine Root Biomass of Two Contrasting Urban Tree Cultivars in Response to Drought Stress. *Forests*, 11(1), 108. <https://doi.org/10.3390/f11010108>
- Zhang, J.-H., Huang, W.-D., Liu, Y.-P., & Pan, Q.-H. (2005). Effects of Temperature Acclimation Pretreatment on the Ultrastructure of Mesophyll Cells in Young Grape Plants (*Vitis vinifera* L. cv. Jingxiu) Under Cross-Temperature Stresses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 47(8), 959–970. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2005.00109.x>
- Zhu, J., Zhang, Q., Li, L., Liu, Y., Li, H., & Xu, C. (2023). Traits coordination at leaf and branch level in response to the urban environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 89, 128128. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128128>
- Zimmermann, J., Link, R. M., Hauck, M., Leuschner, C., & Schuldt, B. (2021). 60-year record of stem xylem anatomy and related hydraulic modification under increased summer drought in ring- and diffuse-porous temperate broad-leaved tree species. *Trees*, 35(3), 919–937. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02090-2>
- Zimmermann, M. H. (1983). *Xylem structure and the ascent of sap*. Springer-Verlag.
- Zimmermann, M. H., & Brown, C. L. (1971). *Trees. Structure and function*. Springer Verlag. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19729305181>
- Zipper, S. C., Schatz, J., Kucharik, C. J., & Loheide, S. P. (2017). Urban heat island-induced increases in evapotranspirative demand. *Geophysical Research Letters*, 44(2), 873–881. <https://doi.org/10.1002/2016GL072190>