Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

**Band:** 100 (2021)

**Artikel:** Arborisation urbaine lausannoise et changements climatiques

Autor: Pellet, Jérôme / Sonnay, Vincent / Randin, Christophe

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-953537

## Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

## **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 17.11.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

# Arborisation urbaine lausannoise et changements climatiques

Jérôme PELLET<sup>1\*</sup>, Vincent SONNAY<sup>1</sup>, Christophe RANDIN<sup>2,3</sup>, Pascal SIGG<sup>4</sup>, Michael ROSSELET<sup>5</sup>, Emmanuel GRAZ<sup>5</sup>

Pellet J., Sonnay V., Randin C., Sigg P., Rosselet M. & Graz E., 2021. Arborisation urbaine lausannoise et changements climatiques. Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles 100: 73-89.

#### Résumé

L'arborisation urbaine, que celle-ci concerne des arbres d'avenues, de places, de parcs ou des forêts urbaines, rend de nombreux services écosystémiques, parmi lesquels la réduction des îlots de chaleur. Les projections climatiques pour le siècle à venir impliquent que les essences arborées plantées en ville doivent être choisies en fonction de leur adéquation au climat des prochaines décennies. À l'aide d'une modélisation de la niche climatique de 110 essences candidates, nous évaluons leur potentiel d'adéquation avec le climat prédit en ville de Lausanne à l'horizon 2070 en introduisant une nouvelle notion d'indigénat climatique. Couplé à d'autres critères (potentiel pour la biodiversité, potentiel envahissant et sensibilité aux ravageurs), nous proposons un système d'aide à la décision pour le choix des essences qui s'inscrit dans une stratégie de développement de la résilience de l'arborisation urbaine face aux changements climatiques et ses corollaires.

*Mots-clés:* Arbres, îlots de chaleur, indigénat climatique, résilience, zones urbaines.

Pellet J., Sonnay V., Randin C., Sigg P., Rosselet M. & Graz E., 2021. Urban arborization in Lausanne under climate changes. Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles 100: 73-89.

#### **Abstract**

Urban trees, whether planted along streets, in parks or as small groves, provide numerous ecosystem services, among which the reduction of urban heat islands. Climate projections for the coming century implies that tree species' ability to resist future climate must be evaluated prior to plantation. Using climatic niche modeling for 110 candidate tree species, we assess their potential for urban arborization of Lausanne by 2070, all the while introducing a new concept of "climatic indigeneity". Coupled with other criterion (potential for biodiversity, invasiveness and sensitivity to pests), we offer a decision support tool for the choice of urban tree species and a strategy for a resilient urban arborization in the face of climate changes.

Keywords: Climatic indigeneity, resilience, trees, urban areas, urban heat islands.

<sup>\*</sup>Auteur pour correspondance: jerome.pellet@nplusp.ch



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> n+p biologie, Rue des Deux-Marchés 15, CH-1005 Lausanne

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Département d'Écologie & d'Évolution (DEE), Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Centre alpien de phytogéographie (CAP), Route de l'Adray 27, CH-1938 Champex-lac

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Arboretum du Vallon de l'Aubonne, Chemin de Plan 92, CH-1170 Aubonne

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne, Avenue du Chablais 46, CH-1007 Lausanne

# INTRODUCTION

L'arborisation urbaine, qu'elle se développe sous la forme de forêts urbaines, de bosquets, d'arbres de parcs, de places ou d'avenues, joue un rôle fondamental dans les villes et villages. Les services écosystémiques rendus sont multiples: régulation microclimatique, atténuation des nuisances sonores, épuration de l'air, séquestration de carbone et contribution aux trames écologiques pour ne citer que les plus importantes (Selmi & Weber 2017, OFEV 2018, Schlaepfer et al. 2018, Marselle et al. 2020). Les arbres contribuent par ailleurs au bienêtre et à la santé de la population vivant dans un espace urbain. Le maintien de l'arborisation urbaine, de même que son développement quantitatif et qualitatif, représente donc un enjeu majeur de politique publique.

Le territoire urbain génère de nombreux facteurs de stress pour les arbres, dont l'intensité culmine pour les arbres d'avenues (Brune 2016, Clergeau 2020). L'imperméabilisation des sols par des revêtements tels qu'asphalte ou béton, en particulier sous la canopée des arbres, induit un stress hydrique important. La densification des infrastructures de services souterraines (eau, gaz, électricité, ...) réduit le volume de sol disponible pour les systèmes racinaires et expose ces derniers à des atteintes répétées lors des fréquents travaux d'entretien et de fouilles. Le compactage (notamment celui provoqué par les machines de chantier modernes lors des travaux précités) et la perte de porosité des sols réduisent la capacité de respiration racinaire de façon drastique. L'accès à l'air n'est plus garanti pour les racines qui n'arrivent plus à se frayer un chemin dans ces sols trop denses. La nature des matériaux de remblayage (structure portante des routes), non gélive, est exempte de particules fines et d'éléments susceptibles de jouer un rôle nourricier, même amoindri. Enfin, le microclimat urbain (îlot de chaleur) expose les arbres à des températures plus élevées que leurs congénères forestiers ou ruraux.

Depuis le début des premières mesures météorologiques en 1864, les changements suivants ont déjà été constatés en Suisse:

- une augmentation des températures moyennes de l'ordre de 2 °C avec une accélération marquée depuis les années 1980 ayant pour corollaire des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses et des périodes froides toujours plus rares (Rebetez & Reihnard 2008);
- une hausse d'environ 300 à 400 m d'altitude de l'isotherme hivernale du 0 °C avec pour conséquence une réduction de 50 % du nombre de jour avec des précipitations sous forme de neige en dessous de 800 m (Klein *et al.* 2016, Defila *et al.* 2020);
- un allongement de la période de végétation compris entre 2 et 4 semaines depuis les années 1960 (Defila & Clot 2001);
- un accroissement des précipitations hivernales et une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements pluvieux extrêmes tout au long de l'année (SCHMIDLI & FREI 2005).

Toutes les essences arborées urbaines ne font pas preuve de la même résilience face à ces pressions climatiques. Si certaines montrent des signes de faiblesse à la moindre vague de chaleur (p.ex. *Fagus sylvatica*, *Tilia cordata*, *Acer platanoides*), d'autres semblent s'en accommoder sans trop de difficultés (par exemple *Ulmus minor*, *Acer campestre*, *Quercus petraea*). Une grande incertitude demeure sur la capacité des diverses essences habituellement plantées en ville à faire face à l'amplitude de l'effondrement climatique prévu pour la fin du siècle.

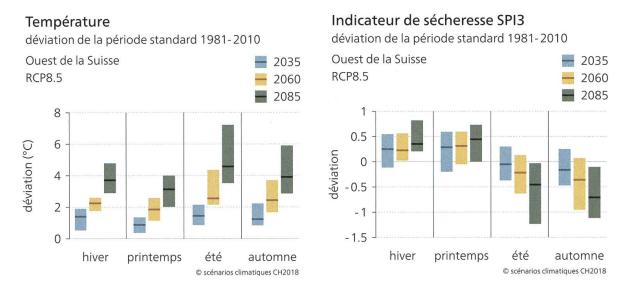
À l'avenir et selon un scénario tablant sur une augmentation continue des émissions de gaz à effet de serre (RCP8.5; IPCC 2014) tout au long du xxr<sup>e</sup> siècle, il faut s'attendre en Suisse à (figure 1):

- un réchauffement de 2 à 3 °C supplémentaires d'ici le milieu du xx1<sup>e</sup> siècle;
- une augmentation significative du nombre de journées estivales et de nuits tropicales;
- des étés plus secs (entre +3 % et -26 % de pluie) avec une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur estivale;
- une hausse des précipitations hivernales avec davantage de pluie que de neige en raison de la hausse des températures;
- une raréfaction des jours de gel et des vagues de froid intense bien que des périodes hivernales froides continueront à se produire pendant encore plusieurs décennies.

À noter enfin que les températures suivent actuellement la trajectoire du scénario RCP8.5. Considérant que les arbres d'avenues ou de places ont une espérance de vie comprise entre 40 et 150 ans (durée de vie qui chute drastiquement au vu des évolutions constructives et climatiques évoquées ci-dessus), il devient impératif de sélectionner des essences adaptées à ce climat futur afin de garantir la pérennité de l'arborisation urbaine et des services écosystémiques rendus aux habitant·e·s.

Cette étude, mandatée par le Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne, vise cinq objectifs:

- 1. évaluer l'adéquation de diverses essences arborées au climat prédit pour Lausanne en 2070;
- 2. identifier les régions du globe présentant une similarité climatique avec ce climat (introduction de la notion d'indigénat climatique);



**Figure 1.** Déviation de la période standard 1981-2010 des températures saisonnières et de l'indicateur de sécheresse (SPI3; « Standardized precipitation index ») pour l'ouest de la Suisse selon le scénario d'émission sans atténuation climatique RCP8.5 (CH2018 2018) et pour trois périodes de 30 ans du xxl<sup>e</sup> siècle (2035: 2020-2049; 2060: 2045-2074; 2085: 2070-2099). Les limites inférieure et supérieure des barres colorées représentent la plage de quantiles empiriques, couvrant la limite inférieure (5 %) et supérieure (95 %) des projections (90 % des températures et de l'indicateur de sécheresse projetés par l'ensemble de modèles se situent dans cette plage). Le milieu des bars (ligne noire) est l'estimation médiane attendue de la moitié d'une sélection de simulations climatiques de l'initiative EUROCORDEX (https://www.euro-cordex.net).

- 3. identifier les essences dont la contribution potentielle à la diversité biologique urbaine est la plus élevée;
- 4. identifier les essences qui présentent des risques biologiques anticipables (potentiel envahissant ou sensibilité connue aux ravageurs);
- 5. sur la base des points précédents, fournir un outil d'aide à la décision pour le choix des essences, l'appréciation des provenances régionales et le maintien du patrimoine arboré en ville de Lausanne.

# **MÉTHODES**

## Adéquation climatique

Le climat qui prévaut actuellement sur le Plateau suisse est un climat de type continental tempéré et humide. Il se caractérise par des précipitations annuelles moyennes comprises entre 800 et 1 400 mm tombant majoritairement sous forme de pluie sans cycle saisonnier particulier, de fréquentes gelées hivernales et des étés qui connaissent quelques dizaines de journées estivales et des jours tropicaux en petit nombre (OFEV 2018). Pour faire face aux changements climatiques attendus sur le Plateau suisse et énumérés en introduction, les arbres devront en particulier présenter une bonne tolérance aux stress thermiques et hydriques (ces derniers étant par ailleurs accentués en milieu urbain par l'imperméabilisation des sols et par le phénomène d'îlots de chaleur). Plusieurs études récentes indiquent que ce sont bien ces deux paramètres qui influencent le plus la survie des arbres dans un contexte de changements climatiques (ROLOFF 2009, BRUNE 2016, VOGT 2017, SENF et al. 2020).

Nous avons extrait, pour chacune des essences candidates listées dans le tableau 2, l'ensemble des points d'observations réunis dans le Global Biodiversity Information Facility (GBIF). Les données d'occurrence des espèces d'arbres extraites de GBIF ont été filtrées séquentiellement selon les critères de Randin *et al.* (2013): (i) positions géographiques déterminées à partir d'observations ou d'un spécimen uniquement, (ii) incertitude horizontale de la coordonnée de < 1 000 m et (iii) une observation seulement par pixel des cartes climatiques (voir détails cidessous) pour diminuer l'autocorrélation spatiale. Il n'est pas possible d'estimer le biais d'échantillonnage pour l'ensemble des espèces, mais les données extraites de GBIF représentent la meilleure estimation possible de la niche climatique à l'échelle des continents.

Pour chacune des localisations ainsi récoltées, les valeurs de sept variables climatiques (tableau 1) ont été extraites de la base CHELSA (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas; https://chelsa-climate.org, KARGER et al. 2017) pour une période de référence actuelle (1979-2013) et future pour la fin du xxI<sup>e</sup> siècle (2070: 2061-2080). Les variables climatiques ont été retenues pour leur impact sur la physiologie des arbres dans le contexte d'augmentation des températures, d'augmentation des vagues de chaleur et de diminution des précipitations attendues sur l'année et durant l'été en Suisse.

La niche climatique de chaque essence candidate a ensuite été décrite au travers d'une analyse en composantes principales (ACP; fonction *prcomp* de la librairie *stats*; R CORE TEAM 2020) qui a permis de réduire les sept variables climatiques à seulement deux dimensions représentées le long de deux ou trois premiers axes indépendants. La variance des sept dimensions initiales est maximisée le long de ces axes qui expliquent la majorité de la variabilité. Pour chaque essence, nous avons superposé à cette niche climatique la position du climat de

<b>Tableau 1.</b> Variables climatiques retenues pour l	es analyses en composantes principales (ACP	).
---	---	----

Variable climatique extraite de CHELSA	Unité	Acronyme
Température moyenne annuelle	°C	tavey
Température du trimestre le plus sec	°C	tave_dryq
Température du trimestre le plus chaud	°C	tave_warmq
Température maximum du mois le plus chaud	°C	tavemax_w_month
Somme des précipitations annuelles	mm	precy
Somme des précipitations du trimestre le plus sec	mm	prec_dryq
Somme des précipitations du trimestre le plus chaud	l mm	prec_warmq

Lausanne en 2070 et mesuré sa position (en percentile) sur les deux premiers axes de l'ACP. La position géographique de Lausanne qui sert à caractériser son climat correspond au centre de la commune (longitude: 6.633597, latitude: 46.519962). Lorsque la valeur du percentile pour un axe est de 50 %, cela signifie que le climat de Lausanne en 2070 correspond au centre de gravité de la niche climatique de l'essence en question et que celle-ci est donc adéquate. Lorsque ce percentile est situé aux extrêmes de la distribution sur l'axe (< 20 % ou > 80 %), cela signifie que le climat de Lausanne en 2070 se situera en périphérie de la niche climatique de l'essence et que celle-ci risque donc de ne pas se développer de manière satisfaisante.

## Similarités climatiques

Dans un deuxième temps, une nouvelle ACP (fonction *prcomp* de la librairie *stats*; R Core Team 2020), basée sur les 7 paramètres du tableau 1 a été réalisée sur l'ensemble du globe avec une distance de 30 km entre chaque point possédant des projections du climat, ceci afin de diminuer les effets d'autocorrélation spatiale. La grille de 30 km est basée sur les écorégions terrestres du WWF (Olson *et al.* 2001) afin de permettre des analyses ultérieures en intégrant les biomes. La grille n'est donc pas une surface de type raster mais un lattice avec des points distants de 30 km. Pour chacun des points de cette grille, la similarité climatique (distance euclidienne sur les deux premiers axes de l'ACP) avec le climat prédit pour Lausanne en 2070 (RCP8.5) a été calculée et projetée sur le globe. Cette approche permet de localiser les surfaces où le climat actuel ressemble le plus à celui attendu à Lausanne en 2070. Les valeurs seuils retenues pour les catégories « Extrêmement élevée », « Très élevée », « Moyennement élevée » et « Modérément élevée » sont de 0,2, 0,4, 0,6 et 0,8 respectivement (figure 3). Cette approche permet d'identifier dans quels pays et biomes se trouvent les semenciers les plus adaptés.

Toutes les analyses et les graphiques ont été produits dans les logiciels libres R (R Core Team 2020) et QGIS V3.16.2 (QGIS.org 2021).

## Contribution à la diversité biologique

Le potentiel des essences arborées à favoriser la biodiversité en ville (cryptogames et invertébrés en particulier) dépend d'une multitude de facteurs, parmi lesquels l'emplacement, la dimension, l'âge ou encore l'état sanitaire. Toutefois, toutes les essences d'arbres ne contribuent pas pareillement au maintien de la biodiversité locale ou au renforcement des trames écologiques. Certaines essences ou genres sont connus pour abriter une plus grande richesse spécifique que d'autres (genres *Quercus* ou *Salix* par exemple, voir GLOOR & GÖLDI-HOFBAUER 2018).

Par ailleurs, on peut également relever que des essences aujourd'hui exotiques (dont l'aire de distribution naturelle ne couvre pas la Suisse) seront d'autant moins aptes à accueillir des organismes indigènes que leur distribution naturelle est éloignée et qu'elles font partie de groupes phylogénétiques absents ou distants de cette même aire.

L'appréciation du potentiel pour la biodiversité présentée dans le tableau 2 s'appuie donc en premier lieu sur les travaux de GLOOR & GÖLDI-HOFBAUER (2018) et, pour toutes les autres essences candidates qui ne sont pas évaluées dans la publication précitée, sur:

- la distance géographique entre la distribution naturelle et l'ouest de la Suisse (nulle si l'essence est naturellement présente sur l'arc lémanique, moyenne si l'aire de distribution recouvre l'Europe continentale sans toutefois comprendre l'arc lémanique, ou élevée si l'aire de distribution est plus éloignée par exemple sur une autre masse continentale);
- la distance phylogénétique à des essences naturellement présentes à l'ouest de la Suisse (nulle si l'essence est déjà présente, moyenne si le genre seulement est présent, élevée dans tous les autres cas).

# Risques biologiques

Plusieurs essences arborées présentent des risques biologiques connus. Le premier risque identifiable est le caractère potentiellement envahissant (par exemple *Robinia pseudoaccacia* ou *Ailanthus altissima* pour ne citer que deux exemples bien documentés en Suisse). L'évaluation de ce caractère potentiellement envahissant s'est faite sur la base de la Liste Noire et de la Watch List (info flora; https://www.infoflora.ch/fr/neophytes/listes-et-fiches.html) d'une part, et de Vogt (2017) tel que détaillé dans la base de données Citree (https://citree.de/) d'autre part.

Le second risque est la susceptibilité des essences arborées à des attaques de ravageurs (cryptogames ou invertébrés en particulier). Cet aspect mérite une attention particulière puisque des arbres affaiblis par les différents stress climatiques urbains seront d'autant plus sensibles aux ravageurs, ces derniers étant par ailleurs souvent favorisés par les températures supérieures qui règnent dans les villes (BRUNE 2016). Cette appréciation s'est faite sur la base de la littérature horticole, en particulier l'Invasive Species Compendium (https://www.cabi. org/isc/), le protocole établi par MANDON-DALGER *et al.* (2012) et les travaux de Weber & Gut (2004).

#### RÉSULTATS

Le tableau 2 liste les 110 essences évaluées et présente les critères d'appréciation suivants :

- quantile des axes 1 et 2. Position de Lausanne en 2070 sur le premier et le second axe de la niche climatique. Les valeurs extrêmes (< 20 % et > 80 %), peu favorables, sont indiquées en rouge;
- trajectoire climatique. Cette valeur indique à quel point le climat de Lausanne en 2070 se rapproche (valeurs positives en vert) ou s'éloigne (valeurs négatives en rouge) du centre de gravité de la niche climatique de l'essence considérée;
- classe d'adéquation climatique. Cette classification allant de 1 à 4 se base sur les critères précédents selon la règle suivante:

classe 1 : essences dont le cœur de la niche climatique inclut le climat de Lausanne en 2070 (quantiles entre 20 % et 80 % sur les deux axes);

Tableau 2. Liste des essences évaluées par classe d'adéquation climatique.

e   Liquidambar styraciflua   55 %   50 %   1.34   1     Betula nigra   35 %   35 %   1.92   1     see   Taxodium distichum   70 %   50 %   2.24   1     Albizia julibrissin   55 %   45 %   2.22   1     Cladrastis kentukea   25 %   45 %   2.22   1     Gleditisia triacanthos   45 %   25 %   1.95   1     Gleditisia triacanthos   45 %   25 %   1.44   1     Skyphnolobium japonicum   75 %   60 %   1.82   1     Skyphnolobium japonicum   75 %   65 %   1.44   1     Morus alba   35 %   20 %   1.48   1     Morus alba   30 %   65 %   1.41   1     Acer buergerianum   60 %   55 %   2.25   1     Sequoia sempervirens   55 %   45 %   1.74   1     Celtis occidentalis   55 %   55 %   0.99   1.25     Cercis siliquas	Famille	Essence	Quantile de l'axe 1	Quantile de l'axe 2	Trajectoire climatique	Classe d'adéquation climatique	Potentiel biodiversité	Écart à la distribution naturelle	Écart phylo- génétique	Risques
e   Betula nigra   35 %   35 %   1.92   1     cée   Toxodium distichum   70 %   50 %   2.24   1     Albizia julibrissin   55 %   45 %   2.22   1     Cladrastis kentukea   25 %   45 %   1.92   1     Gleditsia triacanthos   45 %   2.5 %   1.95   1     Styphnolodus dioica   25 %   65 %   1.44   1     cée   Liriadendron tulipifera   35 %   2.0%   1.44   1     cée   Liriadendron tulipifera   35 %   2.0%   1.44   1     Morus alba   36 %   20 %   1.48   1     Morus alba   30 %   65 %   2.11   1     Prunus yedoensis   55 %   55 %   2.25   1     Pyrus calleryana   40 %   55 %   2.25   1     Cée   Sequoia sempervirens   55 %   25 %   0.99   2     Cée   Sequoia sempervirens   55 %   1.0 %   1.4	Altingiacée	Liquidambar styraciflua	55 %	20 %	1.34	1	Faible	Élevé	Élevé	
cée   Taxodium distichum   70%   50 %   2.24   1     Albizia julibrissin   55 %   45 %   2.22   1     Cladrastis kentukea   25 %   45 %   1.92   1     Gleditsia triacanthos   45 %   25 %   1.95   1     Gleditsia triacanthos   25 %   65 %   1.44   1     cée   Liriodendrou sdioica   25 %   60 %   1.82   1     cée   Liriodendron tulipifera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Liriodendron tulipifera   35 %   20 %   1.14   1     Morus alba   30 %   65 %   2.11   1   1     Morus alba   40 %   35 %   2.10   1   1     Prunus yedoensis   55 %   75 %   1.48   1   2     cée   Acer buergerianum   60 %   55 %   2.25   1   2     cée   Acer buergerianum   56 %   55 %   2.25   1     ce	3étulacée	Betula nigra	35 %	35 %	1.92	1		Élevé	Moyen	
Albizia julibrissin   55 %   45 %   2.22   1     Cladrastis kentukea   25 %   45 %   1.92   1     Gleditsia triacanthos   45 %   25 %   1.95   1     6ymnocladus dioica   25 %   65 %   1.44   1     cée   Liriodendron tulipilera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Liriodendron tulipilera   35 %   20 %   1.41   1     cée   Liriodendron tulipilera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Liriodendron tulipilera   35 %   20 %   1.41   1     Morus alba   30 %   65 %   2.11   1   1     Morus salba   40 %   35 %   2.15   1   1     Pruns yedoensis   55 %   75 %   2.25   1   2     Purus calleryana   40 %   35 %   2.15   1   2     cée   Sequoia sempenirens   55 %   45 %   0.99   2   2     <	Supressacée	Taxodium distichum	% 0.2	20 %	2.24	1		Élevé	Élevé	
Cladrastis kentukea   25 %   45 %   1.92   1     Gleditsia triacanthos   45 %   25 %   1.95   1     6ymnocladus dioica   25 %   65 %   1.44   1     cée   Liriodendron tulipilera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Liriodendron tulipilera   35 %   20 %   1.41   1     cée   Liriodendron tulipilera   35 %   20 %   1.41   1     nocée   Magnolia grandiflora   80 %   20 %   1.41   1     morus alba   30 %   65 %   2.11   1   1     norus selba   40 %   35 %   1.48   1   1     prunus yedoensis   55 %   75 %   2.25   1   1     prunus yedoensis   55 %   75 %   1.74   1   2     cée   Acer buergerianum   60 %   55 %   2.55   1.74   1     cée   Acer buergerianum   60 %   55 %   1.04   2	-abacée	Albizia julibrissin	55 %	45 %	2.22	1		Élevé	Élevé	
cée   Liniodendron tulipifera   25 %   65 %   1.44   1     cée   Liniodendron tulipifera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Liriodendron tulipifera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Liriodendron tulipifera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Liriodendron tulipifera   35 %   20 %   1.41   1     morus alba   30 %   65 %   2.11   1   1     Morus nigra   25 %   80 %   0.58   1   1     Prunus yedoensis   55 %   75 %   1.48   1   1     Pyrus calleryana   40 %   55 %   2.25   1   1     cele   Acer buergerianum   60 %   55 %   2.25   1   2     Celtis occidentalis   80 %   55 %   45 %   1.74   1   2     cée   Sequois sempervirens   55 %   10 %   1.43   2   2     Quercus silex   5	-abacée	Cladrastis kentukea	25 %	45 %	1.92	1		Élevé	Élevé	
cée   Liriodendron tulipifera   25 %   65 %   1.44   1     cée   Liriodendron tulipifera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Liriodendron tulipifera   35 %   30 %   1.69   1     cée   Magnolia grandiflora   80 %   20 %   1.41   1     Morus alba   30 %   65 %   2.11   1   1     Morus alba   30 %   65 %   2.11   1   1     Prunus yedoensis   55 %   75 %   1.48   1   1     Pyrus callenyana   40 %   35 %   2.10   1   1     Pyrus callenyana   60 %   55 %   0.99   1   2     Celtis occidentalis   80 %   55 %   0.14   2   2     Zelkova serrata   55 %   45 %   1.74   1   2     Quercus frainetto   50 %   10 %   0.50   2   2     Quercus frainetto   50 %   10 %   0.50   2	-abacée	Gleditsia triacanthos	45 %	25 %	1.95	Π	Faible	Élevé	Élevé	Potentiellement enva- hissant
cée   Liriodendron tulipifera   75%   60%   1.82   1     cée   Liriodendron tulipifera   35%   30%   1.69   1     cée   Magnolia grandiflora   80%   20%   1.41   1     Morus alba   30%   65%   2.11   1   1     Morus nigra   25%   80%   0.58   1   1     Pyrus calleryana   40%   35%   2.10   1   1     Pyrus calleryana   40%   55%   2.25   1   2     cée   Acer buergerianum   60%   55%   0.99   1   2     Celtis occidentalis   80%   55%   0.14   2   2     cée   Sequoia sempervirens   55%   10%   1.29   2     cée   Sequoia sempervirens   55%   10%   1.43   2     cée   Sequoia sempervirens   55%   10%   1.09   2     Quercus frainetto   50%   10%   0.50   2	-abacée	Gymnocladus dioica	25 %	65 %	1.44	Π		Élevé	Élevé	Potentiellement envahissant, fortement drageonnant
cée   Liriodendron tulipifera   35%   30%   1.69   1     cée   Magnolia grandiflora   80%   20%   1.41   1     Morus alba   30%   65%   2.11   1   1     Morus alba   25%   80%   0.58   1   1     Prunus yedoensis   55%   75%   1.48   1   1     Pyrus calleryana   40%   35%   2.10   1   1     cée   Acer buergerianum   60%   55%   0.99   1   1     cée   Acer buergerianum   55%   45%   1.74   1   2     cée   Sequoia sempervirens   55%   95%   0.14   2   2     cée   Sequoia sempervirens   55%   10%   1.43   2   2     Quercus fainetto   50%   10%   0.50   2   2     Quercus ilex   55%   90%   0.50   2     ée   Platanus orientalis   50%   5%	-abacée	Styphnolobium japonicum	75%	% 09	1.82	1	Faible	Élevé	Élevé	
cée   Magnolia grandiflora   80 %   20 %   1.41   1     Morus alba   30 %   65 %   2.11   1     Morus alba   30 %   65 %   2.11   1     Morus nigra   25 %   80 %   0.58   1     Prunus yedoensis   55 %   75 %   1.48   1     Pyrus calleryana   40 %   35 %   2.10   1     Sée   Acer buergerianum   60 %   55 %   0.99   1     Celtis occidentalis   80 %   55 %   0.14   2     Celkova serrata   55 %   45 %   1.74   1     Cercis siliquastrum   55 %   10 %   1.29   2     Quercus frainetto   50 %   15 %   1.43   2     Quercus frainetto   50 %   10 %   0.50   2     Quercus ilex   55 %   90 %   0.50   2     ée   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16   2	Magnoliacée	Liriodendron tulipifera	35 %	30 %	1.69	1	Faible	Élevé	Élevé	
Morus alba   30 %   65 %   2.11   1     Morus nigra   25 %   80 %   0.58   1     Prunus yedoensis   55 %   75 %   1.48   1     èe   Acer buergerianum   60 %   55 %   2.10   1     cèe   Acer buergerianum   60 %   55 %   2.25   1     cée   Acer buergerianum   80 %   55 %   0.99   1     cée   Sequoia sempervirens   55 %   45 %   1.74   1     cée   Sequoia sempervirens   55 %   10 %   1.29   2     cercis siliquastrum   55 %   10 %   1.43   2     Quercus frainetto   50 %   10 %   1.09   2     Quercus ilex   55 %   90 %   0.50   2     ee   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16   2	Magnoliacée	Magnolia grandiflora	% 08	20 %	1.41	1	Faible	Élevé	Élevé	
Morus nigra   25%   80%   0.58   1     Prunus yedoensis   55%   75%   1.48   1     Pyrus callenyana   40%   35%   2.10   1     sée   Acer buergerianum   60%   55%   2.25   1     celtis occidentalis   80%   55%   0.99   1     zelkova serrata   55%   45%   1.74   1     cée   Sequoia sempervirens   55%   95%   0.14   2     cercis siliquastrum   55%   10%   1.29   2     Quercus frainetto   50%   10%   1.09   2     Quercus frainetto   50%   10%   0.50   2     ee   Platanus orientalis   50%   5%   1.09   2	Moracée	Morus alba	30 %	% 59	2.11	1		Élevé	Élevé	
Prunus yedoensis   55 %   75 %   1.48   1     ée   Acer buergerianum   60 %   55 %   2.10   1     celtis occidentalis   80 %   55 %   2.25   1     Zelkova serrata   55 %   45 %   1.74   1     cée   Sequoia sempervirens   55 %   95 %   0.14   2     cée   Sequoia sempervirens   55 %   10 %   1.29   2     cercis siliquastrum   55 %   10 %   1.43   2     Quercus frainetto   50 %   10 %   1.09   2     Quercus ilex   55 %   90 %   0.50   2     ée   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16   2	Moracée	Morus nigra	25 %	% 08	0.58	1		Élevé	Élevé	
ke   Acer buergerianum   40 %   35 %   2.10   1     celtis occidentalis   80 %   55 %   2.25   1     Celtis occidentalis   80 %   55 %   0.99   1     Zelkova serrata   55 %   45 %   1.74   1     cée   Sequoia sempervirens   55 %   0.14   2     cée   Sequoia sempervirens   55 %   10 %   1.29   2     Cercis siliquastrum   50 %   15 %   1.43   2     Quercus frainetto   50 %   10 %   1.09   2     Quercus frainetto   50 %   90 %   0.50   2     ee   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16   2	Rosacée	Prunus yedoensis	25 %	75 %	1.48	1	Élevé	Élevé	Moyen	
iée   Acer buergerianum   60 %   55 %   2.25     Celtis occidentalis   80 %   55 %   0.99     Zelkova serrata   55 %   45 %   1.74     cée   Sequoia sempervirens   55 %   95 %   0.14     cée   Sequoia sempervirens   55 %   10 %   1.29     Quercus siliquastrum   50 %   10 %   1.43     Quercus frainetto   50 %   10 %   1.09     Quercus ilex   55 %   90 %   0.50     ée   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16	Rosacée	Pyrus calleryana	40 %	35 %	2.10	1	Très élevé	Élevé	Moyen	Hôte du feu bactérien
Celtis occidentalis 80 % 55 % 0.99   Zelkova serrata 55 % 45 % 1.74   cée Sequoia sempervirens 55 % 95 % 0.14   Cercis siliquastrum 55 % 10 % 1.29   Quercus castaneifolia 50 % 15 % 1.43   Quercus frainetto 50 % 10 % 1.09   Quercus ilex 55 % 90 % 0.50   ée Platanus orientalis 50 % 5 % 1.16	Sapindacée	Acer buergerianum	% 09	55 %	2.25	1		Élevé	Moyen	
zelkova serrata 55 % 45 % 1.74   cée Sequoia sempervirens 55 % 95 % 0.14   Cercis siliquastrum 55 % 10 % 1.29   Quercus castaneifolia 50 % 15 % 1.43   Quercus frainetto 50 % 10 % 1.09   Quercus ilex 55 % 90 % 0.50   ée Platanus orientalis 50 % 5 % 1.16	Ulmacée	Celtis occidentalis	% 08	55 %	0.99	1		Élevé	Élevé	
cée   Sequoia sempervirens   55 %   95 %   0.14     Cercis siliquastrum   55 %   10 %   1.29     Quercus castaneifolia   50 %   15 %   1.43     Quercus frainetto   50 %   10 %   1.09     Quercus ilex   55 %   90 %   0.50     ée   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16	Ulmacée	Zelkova serrata	55 %	45 %	1.74	1	Faible	Élevé	Élevé	
Cercis siliquastrum   55 %   10 %   1.29     Quercus castaneifolia   50 %   15 %   1.43     Quercus frainetto   50 %   10 %   1.09     Quercus ilex   55 %   90 %   0.50     ée   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16	Supressacée	Sequoia sempervirens	55 %	95 %	0.14	2		Élevé	Moyen	
Quercus castaneifolia   50 %   15 %   1.43     Quercus frainetto   50 %   10 %   1.09     Quercus ilex   55 %   90 %   0.50     ée   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16	<sup>-</sup> abacée	Cercis siliquastrum	55 %	10%	1.29	2	Faible	Moyen	Élevé	
Quercus frainetto   50 %   10 %   1.09     Quercus ilex   55 %   90 %   0.50     ée   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16	<sup>-</sup> agacée	Quercus castaneifolia	20 %	15 %	1.43	2	Élevé	Faible	Faible	
Quercus ilex   55 %   90 %   0.50     ée   Platanus orientalis   50 %   5 %   1.16	<sup>–</sup> agacée	Quercus frainetto	20 %	10%	1.09	2	Élevé	Faible	Faible	Processionnaire du chêne
e Platanus orientalis 50% 5% 1.16	<sup>c</sup> agacée	Quercus ilex	55 %	% 06	0.50	2	Élevé	Faible	Faible	
	Platanacée	Platanus orientalis	20 %	2 %	1.16	2		Moyen	Moyen	Sensible à l'Oïdium du platane
Salicacée Populus nigra 55 % 59% 0.27 2	Salicacée	Populus nigra	25 %	2 %	0.27	2	Élevé	Faible	Faible	

Tableau 2. (Suite).

	Essence	Quantile de l'axe 1	Quantile de l'axe 2	Trajectoire climatique	Classe d'adéquation climatique	Potentiel biodiversité	Écart à la distribution naturelle	Écart phylo- génétique	Risques
	Paulownia tomentosa	30 %	% 06	0.41	2	Faible	Élevé	Élevé	Envahissant
	Celtis australis	65 %	% 58	1.79	2	Faible	Moyen	Moyen	Potentiellement enva- hissant
	Zelkova carpinifolia	%02	% 06	1.70	2		Moyen	Élevé	
	Alnus cordata	% 08	95 %	-0.89	3		Moyen	Moyen	
	Ostrya carpinifolia	40%	2 %	-0.09	3		Moyen	Moyen	
Cercidyphi- lacée	Cercidiphyllum japonicum	% 08	10%	-1.50	m	Faible	Élevé	Élevé	
Cupressacée	Metasequoia glyptostro- boides	20 %	15 %	-0.15	m	Faible	Élevé	Moyen	
	Quercus cerris	%08	5 %	-1.03	ĸ	Élevé	Faible	Faible	Potentiellement envahissant, Processionnaire du chêne
	Quercus petraea	65 %	% 56	-0.98	ĸ	Élevé	Faible	Faible	Processionnaire du chêne
	Quercus pubescens	30 %	2 %	-0.30	ĸ	Élevé	Faible	Faible	Processionnaire du chêne
Magnoliacée	Magnolia kobus	20 %	% 06	-1.10	3	Faible	Élevé	Élevé	
	Populus alba	9 59	2 %	-0.13	3	Élevé	Faible	Faible	
Sapindacée	Acer monspessulanum	30 %	2 %	-0.39	3		Moyen	Moyen	
Sapindacée	Acer opalus	65 %	% 06	-0.10	3		Faible	Faible	
Sapindacée	Acer pseudoplatanus	20 %	95 %	-0.89	3	Élevé	Faible	Faible	Suie de l'érable
Sapindacée	Aesculus x carnea	20 %	2 %	-0.83	3	Moyen	Moyen	Élevé	Mineuse du marronnier
Sapindacée	Aesculus hippocastanum	20 %	95 %	-0.95	3	Moyen	Moyen	Élevé	Mineuse du marronnier
	Tilia platyphyllos	20 %	10%	-0.72	3		Faible	Faible	
	Tilia tomentosa	% 08	% 06	-0.65	3,		Moyen	Moyen	
	Ulmus glabra	%02	2 %	-0.80	8	Élevé	Faible	Faible	Graphiose et Tenthrède en zigzag de l'orme

Ulmus minor	% 08	2 %	-0.66	က		Faible	Faible	Graphiose et Tenthrède en zigzag de l'orme
Alnus glutinosa	% 06	10%	-0.92	4	Moyen	Faible	Faible	
Alnus incana	10 %	30 %	-0.50	4	Élevé	Faible	Faible	
Betula pendula	10%	20 %	-0.76	4	Élevé	Faible	Faible	
Betula pubescens	10 %	15%	69:0-	4		Faible	Faible	
Betula utilis	95 %	% 08	-1.22	4		Élevé	Moyen	
Carpinus betulus	10 %	65 %	-0.76	4	Élevé	Faible	Faible	
Cornus mas	15 %	10%	-0.89	4		Faible	Faible	
Robinia pseudoacacia	10 %	25 %	-0.72	4	Faible	Élevé	Élevé	Envahissant
Quercus macranthera	% 06	% 06	-0.78	4	Élevé	Faible	Faible	
Quercus robur	10 %	20 %	-0.88	4	Très élevé	Faible	Faible	Processionnaire du chêne
Juglans nigra	85 %	% 02	0.79	4	0.00	Élevé	Moyen	
Juglans regia	15 %	10 %	-0.87	4	Moyen	Faible	Faible	
Pinus pinea	15 %	% 09	1.38	4		Moyen	Moyen	
Pinus sylvestris	85 %	% 06	-0.67	4	Élevé	Faible	Faible	
Prunus avium	10 %	15 %	-0.83	4	Très élevé	Faible	Faible	
Prunus cerasifera	85 %	% 06	-0.91	4	Très élevé	Moyen	Moyen	Très drageonnant
Prunus padus	% 06	% 08	-0.65	4	Élevé	Faible	Faible	
Pyrus communis	10 %	85 %	-0.88	4	Très élevé	Faible	Faible	Hôte du feu bactérien
Phellodendron amurense	85 %	15 %	-2.24	4		Élevé	Élevé	
Populus tremula	10 %	20 %	-0.68	4	Très élevé	Faible	Faible	
Salix alba	85 %	% 06	06:0-	4	Très élevé	Faible	Faible	
Acer campestre	85 %	% 06	-0.82	4	Très élevé	Faible	Faible	
Acer cappadocicum	% 06	55 %	-0.67	4	Moyen	Moyen	Moyen	
Acer x freemanii	% 06	% 09	-0.34	4		Élevé	Moyen	
Acer negundo	% 06	% 0 2	-0.79	4		Élevé	Moyen	Envahissant dans le Sud de la France
Acer platanoides	10 %	% 0.2	-0.61	4	Élevé	Faible	Moyen	
Tilia cordata	85 %	% 06	-0.80	4	Très élevé	Faible	Faible	
Ulmus laevis	10 %	20 %	-0.87	4		Faible	Faible	Graphiose et Tenthrède en zigzag de l'orme

- classe 2: essences dont le premier axe de la niche climatique inclut le climat de Lausanne en 2070 (quantile entre 20 % et 80 %) et pour lesquelles le climat lausannois en 2070 se rapproche du centre de gravité de la niche climatique;
- classe 3: essences dont le premier axe de la niche climatique inclut le climat de Lausanne en 2070 (quantile entre 20 % et 80 %), mais pour lesquelles le climat lausannois en 2070 s'éloigne du centre de gravité de la niche climatique;
- classe 4: essences dont le premier axe de la niche climatique n'inclut pas le climat de Lausanne en 2070 (quantile < 20 % ou > 80 %) et pour laquelle le climat lausannois en 2070 s'éloigne du centre de gravité de la niche climatique.
- la dernière colonne permet de documenter les risques (phytosanitaires et caractère envahissant) connus associés à chaque essence.

La figure 2 illustre, à titre d'exemple, le détail de la modélisation de la niche climatique de quatre essences remarquables. Les quadrants du haut illustrent deux essences de classe d'adéquation climatique 1 (bonne adéquation au climat de Lausanne en 2070) tandis que les quadrants du bas illustrent deux essences inadéquates:

- le centre de gravité de la niche climatique du copalme d'Amérique (*Liquidambar styra-ciflua*) (point noir) est très proche du climat attendu pour Lausanne en 2070 (point rouge);
- le climat de Lausanne (climat actuel = point bleu) va se rapprocher (point rouge) du centre de gravité de la niche climatique du poirier de Chine (*Pyrus calleryana*) (point noir);
- à l'inverse, le climat futur de Lausanne ne sera plus au cœur de la niche climatique du myrobolan (*Prunus cerasifera*) et du tilleul à grandes feuilles (*Tilia platyphyllos*).

Sur l'ensemble des modèles, la somme des variances expliquées par les deux premiers axes de l'ACP se situe entre 70 % et 80 %, le premier axe corrélant avec les quatre facteurs liés aux températures et le deuxième avec les trois facteurs liés aux précipitations (tableau 1). Les corrélations entre variables sont de < 0,7 (fonction pcor de la librairie ppcor; R CORE TEAM 2020).

## Similarités climatiques

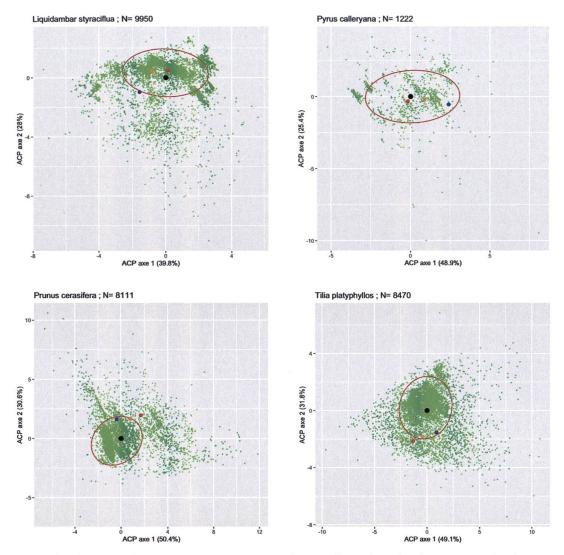
La figure 3 localise les régions de l'écozone holarctique (Europe, Amérique du Nord et Asie) présentant la plus forte similarité climatique avec Lausanne en 2070 (RCP8.5; distance euclidienne sur les deux premiers axes de l'ACP).

Les biomes (selon le découpage du WWF; Olson 2001) présentant la plus grande similarité climatique avec Lausanne en 2070 sont:

- les forêts décidues illyriennes (Albanie, Monténégro, Croatie et Bosnie-Herzégovine);
- les forêts sclérophylles et semi-décidues italiennes (Italie);
- les forêts mixtes du bassin du Pô (Italie);
- les forêts mixtes hyrcaniennes de la Caspienne (Iran);
- les forêts du centre-est du Texas (États-Unis);
- les forêts sempervirentes de feuillus du bassin du Sichuan, du Daba Shan et de la plaine de Changjiang (Chine).

Ce sont dans ces biomes que se trouvent les aires de distribution actuelle des essences de classe d'adéquation climatique 1 du tableau 2, avec:

- Albizia julibrissin et Morus nigra pour l'Europe;
- Liquidambar styraciflua, Betula nigra, Taxodium distichum, Cladrastis kentukea, Gleditsia



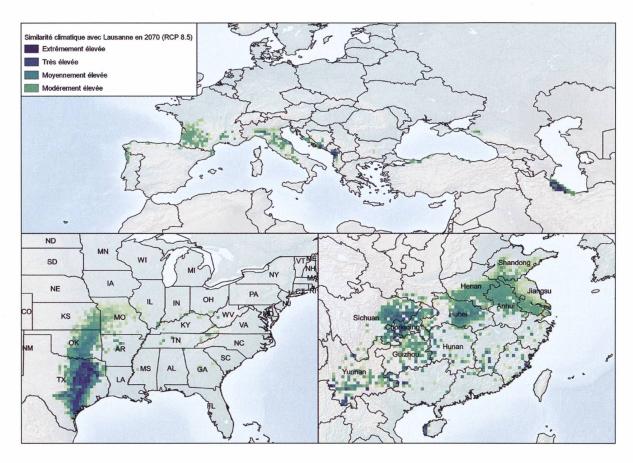
**Figure 2.** Niche climatique de quatre essences. Le nuage de point illustre la niche climatique sur les deux premiers axes de l'ACP avec le centre de gravité de la niche indiqué d'un point noir. Le point bleu figure le climat actuel de Lausanne, les points orange et rouges figurent le climat de Lausanne en 2070 selon les scénarios RCP4.5 et 8.5 respectivement. Le cercle rouge représente le quantile 80 % des observations sur le plan des deux premiers axes de l'ACP.

- triacanthos, Gymnocladus dioica, Liriodendron tulipifera, Magnolia grandiflora et Celtis occidentalis pour l'Amérique du Nord;
- Styphnolobium japonicum, Morus alba, Prunus x yedoensis, Pyrus calleryana, Acer buergerianum et Zelkova serrata pour l'Asie.

## Discussion

# Limites des prédictions climatiques

Les projections climatiques sont empreintes d'incertitudes et la réponse des essences arborées dépend d'une conjonction de facteurs qu'il est complexe d'appréhender globalement d'une part, et localement d'autre part. L'espace urbain de Lausanne présente un gradient altitudinal important pour une agglomération allant de 370 m à plus de 800 m d'altitude. Ce gradient induit d'importantes variations microclimatiques auxquelles s'ajoutent la présence de couloirs



**Figure 3.** Similarité des climats actuels dans l'écozone holarctique avec le climat prédit pour Lausanne en 2070 (RCP8.5). La similarité est calculée comme la distance euclidienne entre le climat de Lausanne dans le scénario RCP 8.5 en 2070 et chaque point du globe sur les deux premiers axes de l'ACP.

de bise descendant du Jorat, une importante hétérogénéité microclimatique directement liée au tissu urbain (quartiers faiblement ou densément bâtis) et un effet tampon du Léman. Cette variabilité spécifiquement lausannoise est délicate à modéliser et nécessite que les aménagistes évaluent, au cas par cas, les stress locaux qui viendront s'ajouter aux facteurs de stress climatique auxquels les arbres plantés devront faire face.

Jusqu'à maintenant, l'approche par « jumelage climatique » de villes ("climate twin cities"; ROHAT et al. 2017) a souvent été restreinte au niveau de l'Europe continentale. Notre modèle de similarité climatique (figure 3) élargit le champ des climats actuels correspondants au climat futur de Lausanne. Nous démontrons ainsi que la transition climatique ne sera pas un simple décalage vers le sud et les climats méditerranéens, mais un décalage méridional dans des zones au relief marqué induisant des régimes de précipitations proches de ceux attendus pour Lausanne. Le renforcement de la continentalité du climat pourrait toutefois être tamponné par la présence du Léman.

Les analyses de notre étude sont basées sur des moyennes climatiques à long terme alors que les événements climatiques extrêmes peuvent avoir un impact sur la survie et la croissance des arbres en ville. Cependant, nos projections restent globalement valides puisque les extrêmes, même dans le futur, sont corrélés aux moyennes (VAN DER WIEL & BINTANJA 2021).

# Variabilité intraspécifique au sein de la niche climatique (écotypes)

Les niches climatiques modélisées dans cette étude s'appuient sur les données réunies au sein de GBIF. Ces données ne composent qu'une image chorologique partielle, vraisemblablement biaisée en faveur des territoires largement prospectés. Le sous-échantillonnage possible sous certains climats se reflétera donc dans notre appréciation de l'adéquation climatique des essences évaluées.

Certaines essences à large distribution, mais dont le centre de gravité de la niche climatique suggère qu'elles seront en moyenne peu adéquates, peuvent présenter des écotypes extrêmes correspondant au climat futur. C'est par exemple le cas de l'érable sycomore (*Acer pseudoplantanus*, classe d'adéquation 3), dont la distribution naturelle s'étend de la Mer Baltique à la Macédoine en passant par l'Albanie. Il est vraisemblable que certains sujets des forêts décidues illyriennes soient adaptés à des conditions de températures et d'humidité correspondant au climat futur de Lausanne. Nos classes d'adéquation climatiques doivent donc être interprétées parallèlement à la niche climatique modélisée (figure 2). Cette interprétation biogéo-climatique doit permettre d'identifier s'il existe des régions climatiques et des biomes où des écotypes semenciers pourraient être trouvés. C'est en particulier le cas pour les essences en classes d'adéquation climatique 2 et 3. Un processus de certification et de traçabilité de la provenance des écotypes (« passeport climatique ») pourrait faciliter les échanges entre fournisseur-euse-s de semences, pépiniéristes et aménagistes.

# Phénologie et gels tardifs

Le climat lausannois est caractérisé par une fourchette de températures minimales hivernales comprises entre -9,4 et -6,7 °C. La température minimale n'a cependant pas été prise en compte dans nos modèles. Il conviendrait donc de s'assurer que les essences identifiées comme présentant le meilleur potentiel de développement soient tolérantes à ces froidures. Ces températures hivernales jouent par ailleurs un rôle fondamental dans l'entrée en dormance des bourgeons tandis que l'accroissement printanier des températures déclenche la levée de dormance et le débourrement. Ces deux mécanismes risquent fort de se voir perturbés dans les décennies à venir :

- le débourrement pourrait intervenir de manière plus précoce avec le réchauffement, exposant les jeunes feuilles et inflorescences à un risque de gels tardifs (ZOHNER et al. 2020). Cet élément n'a pas été pris en compte de manière explicite dans nos modèles. L'appréciation de la sensibilité aux gels tardifs (voir par exemple Roloff 2009) devrait donc être intégrée au processus de choix des essences;
- l'augmentation des températures en automne et en hiver risque par ailleurs de diminuer l'entrée en dormance des arbres ou de rendre celle-ci plus superficielle par manque d'exposition au froid hivernal. Cela pourrait avoir pour conséquence que la levée de dormance serait imparfaite et la précocité du débourrement des feuilles ralentie (Asse 2018 et 2020, VITASSE et al. 2018, Fu et al. 2015).

Enfin, les modifications phénologiques risquent également de créer des décalages entre le réveil des plantes et celui de leurs pollinisateurs (FISOGNI et al. 2020).

## Principe de diversifications

Fort de ce qui précède, on constate que le choix des essences pour constituer l'arborisation urbaine du futur est empreint de plusieurs incertitudes et le fruit d'un compromis entre plusieurs

facteurs. En effet, les essences en moyenne les plus adaptées au climat futur (classes d'adéquation 1 et 2 du tableau 2) sont également celles qui seront les plus sensibles aux gels tardifs des premières décennies à venir. Ce sont également les essences qui sont a priori le moins à même de soutenir la biodiversité indigène (grande distance géographique et phylogénétique).

Un constat général issu du tableau 2 est que les essences de la famille des Fagacées seront généralement moins adéquates à la fin du siècle que celles des Fabacées. Il serait toutefois hasardeux d'en conclure que les premières devraient être définitivement abandonnées au profit des secondes. Un principe de diversification doit prévaloir, afin de limiter les risques systémiques. Cette diversification des essences plantées est souhaitable et doit prévaloir à deux niveaux phylogéniques:

- diversification des espèces, genre et familles représentées. Ce principe pourrait prendre la forme d'une proportion maximale de pieds d'une même essence (10 %), d'un même genre (15 %) ou d'une même famille (20-25 %) au sein du territoire communal. Cela garantirait que des risques non-anticipés ne toucheraient qu'une fraction du patrimoine arboré:
- diversification des écotypes et des provenances au sein d'une essence. Quand bien même une essence ou l'un de ses écotypes serait particulièrement adapté au climat futur, il serait hasardeux de tout miser sur une étroite frange écotypique ou génotypique. Les arbres plantés devraient en conséquence être issus de multiplications sexuées de provenances diverses.

Ces principes de diversification sont par ailleurs renforcés par le récent constat qu'une plus grande diversité des essences dans l'espace urbain contribue à une meilleure réduction des îlots de chaleur (Wang *et al.* 2021).

Il reste enfin à noter que notre analyse n'a porté que sur une sélection de 110 essences candidates et qu'une évaluation de l'adéquation reste à faire pour toutes essences pressenties pour l'arborisation urbaine future. Dans ce cas, la première option d'analyse consiste à superposer la distribution naturelle de l'essence en question avec la figure 3, afin de déterminer si celle-ci est naturellement présente dans des régions au climat similaire à celui attendu à Lausanne en 2070. La seconde option d'analyse consiste à calculer l'ensemble des indicateurs présentés dans le tableau 2 et d'interpréter les analyses en composantes principales à l'exemple de la figure 2.

## Nouveaux écosystèmes urbains

La mobilité de certaines espèces (en particulier les cryptogames et les invertébrés) et le potentiel d'adaptation des espèces aujourd'hui qualifiées d'indigènes permettront des modifications rapides et profondes des communautés hébergées par les arbres urbains. On doit donc s'attendre à voir de nouveaux systèmes d'interactions biologiques apparaître (Hobbs *et al.* 2009), avec des conséquences aujourd'hui impossibles à prédire sur les communautés biologiques urbaines et les interactions au sein de celles-ci (Seastedt *et al.* 2008). Notre appréciation du potentiel des essences pour la biodiversité ou des risques sanitaires se basent essentiellement sur une vision statique du climat passé et actuel (Gloor & Göld-Hofbauer 2018). Tout porte à croire que les interactions prévalant actuellement entre les espèces seront profondément bouleversées dans les décennies à venir. Nos propositions listées dans le tableau 2 devront donc être ré-évaluées à la lumière de l'évolution des connaissances dans un souci permanent de gestion adaptative.

## CONCLUSIONS

Le cataclysme climatique déjà engagé aura un impact sévère sur les écosystèmes urbains et sur les services écosystémiques rendus par l'arborisation. Préserver ces services face à l'augmentation des températures et des déficits hydriques nécessitera d'élargir les palettes végétales actuellement utilisées pour arboriser nos villes et villages et d'abandonner certaines essences dont l'adéquation au climat futur de Lausanne est insuffisante.

Nos analyses présentent une méthode d'appréciation de l'adéquation climatique d'essences candidates et permettent d'identifier celles présentant le meilleur potentiel de développement dans les décennies à venir. Elles proviennent essentiellement de trois régions de l'hémisphère Nord: contours de l'Adriatique, Sud et Centre des États-Unis et Chine. C'est dans ces biomes que se trouveront les semenciers les plus adaptés aux conditions moyennes qui régneront à Lausanne à l'horizon 2070.

L'évolution naturelle de la distribution des espèces va profondément bouleverser les cartes biogéographiques. Cette évolution devra être appréhendée en dépassant les attitudes parfois chauvinistes prévalant dans le domaine de la gestion des ressources naturelles. L'évolution brutale du climat nous force à reconsidérer la notion d'indigénat géographique traditionnelle pour l'étendre à une nouvelle notion d'indigénat climatique. L'évolution de l'ensemble des communautés biologiques urbaines et des relations trophiques qui les modèlent vont subir des transformations aujourd'hui impossibles à prédire, mais vraisemblablement profondes. Les espèces les plus mobiles coloniseront rapidement de nouveaux territoires adéquats, tandis que d'autres, peu mobiles ou sténoèces subiront des extinctions locales. Cette incertitude nous pousse à appliquer, encore plus que dans d'autres domaines de la biologie de la conservation, deux principes de base : un principe de diversification explicite à plusieurs niveaux taxonomiques d'une part, et un principe de gestion adaptative visant à intégrer l'évolution des connaissances dans les pratiques d'aménagement d'autre part.

Les aménagistes de l'espace urbain doivent dès aujourd'hui tout mettre en œuvre pour intégrer les multiples incertitudes en minimisant les risques systémiques par un principe de précaution basé sur la diversification des familles, des genres, des espèces, des écotypes et des provenances des arbres. La présente étude offre un cadrage général pour les professionnel·le·s de l'aménagement urbain: leur expertise sera prépondérante dans l'appréciation fine des conditions microclimatiques et édaphiques prévalant sur le lieu des plantations. Ce sont ces personnes qui garantiront que l'arborisation urbaine sera conservée, voire étendue en quantité et en qualité pour les générations futures.

## BIBLIOGRAPHIE

Asse D., Chuine I., Vitasse Y., Yoccoz N. G., Delpierre N., Badeau V., Delestradea A. & Randin C. F., 2018. Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology* 252: 220-230.

BALESTRA, E., BOURGEOIS F., ELSNER E., GIRARD T., LACHAVANNE Y., RÉMY J. & ROSSELET M., 2015. Les arbres à Lausanne. Service des espaces verts de la Ville de Lausanne, 44 p.

Bastin J. F., Clark E., Elliott T., Hart S., van den Hoogen J. Hordijk I., Ma H., Majumder S., Manoli G., Maschler J., Mo L., Routh D., Yu K., Zohner C. M. & Crowther T. W., 2019. Correction: Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PLOS ONE* 14 (10): e0224120.

- Bender E., Lehning M. & Fiddes J., 2020. Changes in climatology, snow cover, and ground temperatures at high alpine locations. *Frontiers in Earth Science* 8: 100.
- Beniston M., 2014. European isotherms move northwards by up to 15 km/year: using climate analogues for awareness-raising. *International Journal of Climatology* 34: 838-1844.
- BÖLL S., Albrecht R. & Mahsberg D., 2019. Stadtklimabäume geeignete Habitate für die urbane Insektenvielfalt? Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, 11 p.
- Brune M., 2016. Urban trees under climate change; Potential impacts of dry spells and heat waves in three German regions in the 2050s. Report 24. Climate Service Center Germany, Hambourg, 123 p.
- CH2018, 2018. CH2018 Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 p.
- CLERGEAU P. (Ed.), 2020. Urbanisme et biodiversité. Vers un paysage vivant structurant le projet urbain. Editions Apogée, 237 p.
- Defila C. & Clot B., 2001. Phytophenological trends in Switzerland. *International Journal of Biometeorology* 45: 203-207.
- FISOGNI A., HAUTERÈETE N., PIQUOT Y., BRUN M., VANAPPELGHEM C., MICHEZ D. & MASSOL F., 2020. Urbanization drives an early spring for plants but not for pollinators. *Oikos* 129: 1681-1691.
- Fu Y., Zhao H., Piao S. Peaucelle M., Peng S., Zhou G., Ciais P., Huang M., Menzel A., Peńuelas J., Song Y., Vitasse Y., Zeng Z. & Janssens I. A., 2015. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature* 526: 104-107.
- GLOOR S. & GÖLDI-HOFBAUER M., 2018. Der ökologische Wert von Stadtbäumen bezüglich der Biodiversität The ecological value of urban trees with respect to biodiversity. *Jahrbuch der Baumpflege* 22: 33-48.
- HOBBS R. J., HIGGS E. & HARRIS J. A., 2009. Novel ecosystems: implications for conservation and restoration. *Trends in Ecology and Evolution* 24: 599-605.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- KARGER D. N., CONRAD O., BÖHNER J., KAWOHL T., KREFT H., SORIA-AUZA R. W., ZIMMERMANN N. E., LINDER H. P. & KESSLER M., 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4: 170122.
- KLEIN G., VITASSE Y., RIXEN C., MARTY C. & REBETEZ M., 2016. Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change* 139: 637-649.
- MANDON-DALGER M., FRIED G., MARCO A., BRESCH C. & LEBLAY E., 2012. Protocoles de hiérarchisation des plantes invasives en vue de leur gestion: existant et perspectives en France. Revue Science Eaux & Territoires 6: 86-91.
- Marselle M., Bowler D., Watzema J., Eichenberg D., Kirsten T. & Bonn A., 2020. Urban street tree biodiversity and antidepressant prescriptions. *Nature Scientific Reports* 10: 22445.
- Monnerat C., Barbalat S., Lachat T. & Gonseth Y., 2016. Liste rouge des Coléoptères Buprestidés, Cérambycidés, Cétoniidés et Lucanidés. OFEV, Berne: Info Fauna CSCF, Neuchâtel; Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf. *L'environnement pratique* 1622.
- OFEV (Ed.), 2018. Quand la ville surchauffe. Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement 1812.
- Olson D. M., Dinerstein E., Wikramanayake E. D., Burgess N. D., Powell G. V. N., Underwood E. C., D'Amico J. A., Itoua I., Strand H. E., Morrison J. C., Loucks C. J., Allnutt T. F., Ricketts T. H., Kura Y., Lamoreux J. F., Wettengel W. W., Hedao P. & Kassem K. R., 2001. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. *BioScience* 51: 935-938.
- QGIS.ORG, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org.
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. http://www.R-project.org/
- RANDIN C. F., PAULSEN J., VITASSE Y., KOLLAS C., WOHLGEMUTH T., ZIMMERMANN N. E. & KOERNER C., 2013. Do the elevational limits of deciduous tree species match their thermal latitudinal limits? *Global Ecology and Biogeography* 22: 913-923.
- REBETEZ M. & REINHARD M., 2008. Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004. Theoretical and Applied Climatology 91: 27-34.
- Reckien D., Flacke J., Dawson R. J., Heidrich O., Olazabal M., Foley A., Hamann J. J., Orru H., Salvia M., De Gregorio Hurtado S., Geneletti D. & Pietrapertosa F., 2014. Climate change response in

- Europe, what's the reality? Analysis of adaptation and mitigation plan from 200 urban areas in 11 countries. *Climatic Change* 122: 331-340.
- ROLOFF A., KORN A. & GILLNER S., 2009. The Climate-Species-Matrix to select tree species for urban habitats considering climate change. *Urban Forestry and Urban Greening* 8: 295-308.
- Schlaepfer M. A., Guinaudeau B. P., Robert O. & Amos E., 2018. Projet NOS-ARBRES Synthèse pour les instances de décision. 39 p.
- SCHMIDLI J. & Frei C., 2005. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology* 25: 753-771.
- Seastedt T. R., Hobbs R. J. & Suding K. N., 2008. Management of novel ecosystems: are novel approaches required? Frontiers in Ecology and the Environment 6: 547-553.
- Selmi W. & Weber C., 2017. Évaluation des services écosystémiques urbains: de la rhétorique à la pratique. L'apport de l'approche par habitat. *Environnement Urbain* 11.
- SENF C., BURAS A., ZANG C. S., RAMMIG A. & SEIDL R., 2020. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications* 11: 6200.
- Ungar J., Peters-Anders J. & Loibl W., 2011. Climate Twins An attempt to quantify climatological similarities. *In*: Hřebíček J., Schimak G. & Denzer R. (Eds.) Environmental Software Systems. Frameworks of eEnvironment. ISESS 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 359. Springer, Berlin, Heidelberg.
- VAN DER WIEL K. & BINTANJA R., 2021. Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth & Environment* 2.
- VITASSE Y., SIGNARBIEUX C. & Fu Y. H., 2018. More uniform spring phenology across elevations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: 1004-1008.
- Vogt J., Gillner S., Hofmann M., Tharang A., Dettmann S., Gerstenberg T., Schmidt C., Gebauer H., Van de Riet K., Berger U. & Roloff A., 2017. Citree: A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning* 157: 14-25.
- WANG X., DALLIMER M., SCOTT C. E., SHI W. & GAO J., 2021. Tree species richness and diversity predicts the magnitude of urban heat island mitigation effects of greenspaces. *Science of the Total Environment* 770.
- Weber E & Gut D., 2004. Assessing the risk of potentially invasive plant species in central Europe. *Journal for Nature Conservation* 12: 171-179.
- Yang J., 2009. Assessing the impact of climate change on urban tree species selection: a case study in Philadelphia. *Journal of Forestry* 107: 364-372.
- ZOHNER C. M., Mo L., RENNER S. S. et al., 2020. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117: 12192-12200.