

Arborisation urbaine lausannoise et changements climatiques

Jérôme PELLET^{1*}, Vincent SONNAY¹, Christophe RANDIN^{2,3}, Pascal SIGG⁴,
Michael ROSSELET⁵, Emmanuel GRAZ⁵

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.

¹ n+p biologie, Rue des Deux-Marchés 15, CH-1005 Lausanne

² Département d'Écologie & d'Évolution (DEE), Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne

³ Centre alpin de phytogéographie (CAP), Route de l'Adray 27, CH-1938 Champex-lac

⁴ Arboretum du Vallon de l'Aubonne, Chemin de Plan 92, CH-1170 Aubonne

⁵ Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne, Avenue du Chablais 46, CH-1007 Lausanne

*Auteur pour correspondance: jerome.pellet@nplusp.ch

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 (SELMİ & WEBER 2017, OFEV 2018, SCHLAEPFER *et al.* 2018, MARSELLE *et al.* 2020). Les arbres contribuent par ailleurs au bien-être 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 & REHNARD 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 (SCHMIDLİ & 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 xxi^e siècle, il faut s'attendre en Suisse à (figure 1):

- un réchauffement de 2 à 3 °C supplémentaires d'ici le milieu du xxi^e 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.

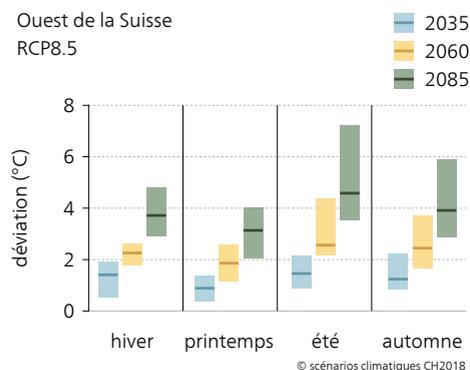
Cette étude, mandatée par le Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne, vise cinq objectifs:

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);

Température

déviations de la période standard 1981-2010

Ouest de la Suisse
RCP8.5



Indicateur de sécheresse SPI3

déviations de la période standard 1981-2010

Ouest de la Suisse
RCP8.5

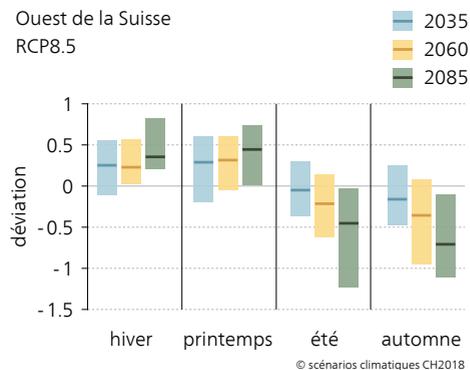


Figure 1. Déviations de la période standard 1981-2010 des températures saisonnières et de l'indicateur de sécheresse (SPI3; « Standardized precipitation index ») pour l'ouest de la Suisse selon le scénario d'émission sans atténuation climatique RCP8.5 (CH2018 2018) et pour trois périodes de 30 ans du xxi^e 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 ci-dessous) 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^e 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

Tableau 1. Variables climatiques retenues pour les 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	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.

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 phylogénétique	Risques
Altingiacée	<i>Liquidambar styraciflua</i>	55 %	50 %	1.34	1	Faible	Élevé	Élevé	
Bétulacée	<i>Betula nigra</i>	35 %	35 %	1.92	1		Élevé	Moyen	
Cupressacée	<i>Taxodium distichum</i>	70 %	50 %	2.24	1		Élevé	Élevé	
Fabacée	<i>Albizia julibrissin</i>	55 %	45 %	2.22	1		Élevé	Élevé	
Fabacée	<i>Cladrastis kentukea</i>	25 %	45 %	1.92	1		Élevé	Élevé	
Fabacée	<i>Gleditsia triacanthos</i>	45 %	25 %	1.95	1	Faible	Élevé	Élevé	Potentiellement envahissant
Fabacée	<i>Gymnocladus dioica</i>	25 %	65 %	1.44	1		Élevé	Élevé	Potentiellement envahissant, fortement drageonnant
Fabacée	<i>Styphnolobium japonicum</i>	75 %	60 %	1.82	1	Faible	Élevé	Élevé	
Magnoliacée	<i>Liriodendron tulipifera</i>	35 %	30 %	1.69	1	Faible	Élevé	Élevé	
Magnoliacée	<i>Magnolia grandiflora</i>	80 %	20 %	1.41	1	Faible	Élevé	Élevé	
Moracée	<i>Morus alba</i>	30 %	65 %	2.11	1		Élevé	Élevé	
Moracée	<i>Morus nigra</i>	25 %	80 %	0.58	1		Élevé	Élevé	
Rosacée	<i>Prunus yedoensis</i>	55 %	75 %	1.48	1	Élevé	Élevé	Moyen	
Rosacée	<i>Pyrus calleryana</i>	40 %	35 %	2.10	1	Très élevé	Élevé	Moyen	Hôte du feu bactérien
Sapindacée	<i>Acer buergerianum</i>	60 %	55 %	2.25	1		Élevé	Moyen	
Ulmacée	<i>Celtis occidentalis</i>	80 %	55 %	0.99	1		Élevé	Élevé	
Ulmacée	<i>Zelkova serrata</i>	55 %	45 %	1.74	1	Faible	Élevé	Élevé	
Cupressacée	<i>Sequoia sempervirens</i>	55 %	95 %	0.14	2		Élevé	Moyen	
Fabacée	<i>Cercis siliquastrum</i>	55 %	10 %	1.29	2	Faible	Moyen	Élevé	
Fagacée	<i>Quercus castaneifolia</i>	50 %	15 %	1.43	2	Élevé	Faible	Faible	Processionnaire du chêne
Fagacée	<i>Quercus frainetto</i>	50 %	10 %	1.09	2	Élevé	Faible	Faible	
Fagacée	<i>Quercus ilex</i>	55 %	90 %	0.50	2	Élevé	Faible	Faible	
Platanacée	<i>Platanus orientalis</i>	50 %	5 %	1.16	2		Moyen	Moyen	Sensible à l'Oïdium du platane
Salicacée	<i>Populus nigra</i>	55 %	5 %	0.27	2	Élevé	Faible	Faible	

Tableau 2. (Suite).

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 phylogénétique	Risques
Scrophulariacée	<i>Paulownia tomentosa</i>	30 %	90 %	0.41	2	Faible	Élevé	Élevé	Envahissant
Ulmacée	<i>Celtis australis</i>	65 %	85 %	1.79	2	Faible	Moyen	Moyen	Potentiellement envahissant
Ulmacée	<i>Zelkova carpinifolia</i>	70 %	90 %	1.70	2		Moyen	Élevé	
Bétulacée	<i>Alnus cordata</i>	80 %	95 %	-0.89	3		Moyen	Moyen	
Bétulacée	<i>Ostrya carpinifolia</i>	40 %	5 %	-0.09	3		Moyen	Moyen	
Cercidiphyllacée	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	80 %	10 %	-1.50	3	Faible	Élevé	Élevé	
Cupressacée	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	20 %	15 %	-0.15	3	Faible	Élevé	Moyen	
Fagacée	<i>Quercus cerris</i>	80 %	5 %	-1.03	3	Élevé	Faible	Faible	Potentiellement envahissant, Processionnaire du chêne
Fagacée	<i>Quercus petraea</i>	65 %	95 %	-0.98	3	Élevé	Faible	Faible	Processionnaire du chêne
Fagacée	<i>Quercus pubescens</i>	30 %	5 %	-0.30	3	Élevé	Faible	Faible	Processionnaire du chêne
Magnoliacée	<i>Magnolia kobus</i>	20 %	90 %	-1.10	3	Faible	Élevé	Élevé	
Salicacée	<i>Populus alba</i>	65 %	5 %	-0.13	3	Élevé	Faible	Faible	
Sapindacée	<i>Acer monspessulanum</i>	30 %	5 %	-0.39	3		Moyen	Moyen	
Sapindacée	<i>Acer opalus</i>	65 %	90 %	-0.10	3		Faible	Faible	
Sapindacée	<i>Acer pseudoplatanus</i>	50 %	95 %	-0.89	3	Élevé	Faible	Faible	Suite de l'érable
Sapindacée	<i>Aesculus x carnea</i>	50 %	5 %	-0.83	3	Moyen	Moyen	Élevé	Mineuse du marronnier
Sapindacée	<i>Aesculus hippocastanum</i>	20 %	95 %	-0.95	3	Moyen	Moyen	Élevé	Mineuse du marronnier
Tiliacée	<i>Tilia platyphyllos</i>	20 %	10 %	-0.72	3		Faible	Faible	
Tiliacée	<i>Tilia tomentosa</i>	80 %	90 %	-0.65	3		Moyen	Moyen	
Ulmacée	<i>Ulmus glabra</i>	70 %	5 %	-0.80	3	Élevé	Faible	Faible	Graphiose et Tenthrède en zigzag de l'orme

Ulmacée	<i>Ulmus minor</i>	80 %	5 %	-0.66	3		Faible	Faible	Graphiose et Tenthrède en zigzag de l'orme
Bétulacée	<i>Alnus glutinosa</i>	90 %	10 %	-0.92	4	Moyen	Faible	Faible	
Bétulacée	<i>Alnus incana</i>	10 %	30 %	-0.50	4	Élevé	Faible	Faible	
Bétulacée	<i>Betula pendula</i>	10 %	50 %	-0.76	4	Élevé	Faible	Faible	
Bétulacée	<i>Betula pubescens</i>	10 %	15 %	-0.69	4		Faible	Faible	
Bétulacée	<i>Betula utilis</i>	95 %	80 %	-1.22	4		Élevé	Moyen	
Bétulacée	<i>Carpinus betulus</i>	10 %	65 %	-0.76	4	Élevé	Faible	Faible	
Cornacée	<i>Cornus mas</i>	15 %	10 %	-0.89	4		Faible	Faible	
Fabacée	<i>Robinia pseudoacacia</i>	10 %	25 %	-0.72	4	Faible	Élevé	Élevé	Envahissant
Fagacée	<i>Quercus macranthera</i>	90 %	90 %	-0.78	4	Élevé	Faible	Faible	
Fagacée	<i>Quercus robur</i>	10 %	50 %	-0.88	4	Très élevé	Faible	Faible	Processionnaire du chêne
Juglandacée	<i>Juglans nigra</i>	85 %	70 %	0.79	4		Élevé	Moyen	
Juglandacée	<i>Juglans regia</i>	15 %	10 %	-0.87	4	Moyen	Faible	Faible	
Pinacée	<i>Pinus pinea</i>	15 %	60 %	1.38	4		Moyen	Moyen	
Pinacée	<i>Pinus sylvestris</i>	85 %	90 %	-0.67	4	Élevé	Faible	Faible	
Rosacée	<i>Prunus avium</i>	10 %	15 %	-0.83	4	Très élevé	Faible	Faible	
Rosacée	<i>Prunus cerasifera</i>	85 %	90 %	-0.91	4	Très élevé	Moyen	Moyen	Très drageonnant
Rosacée	<i>Prunus padus</i>	90 %	80 %	-0.65	4	Élevé	Faible	Faible	
Rosacée	<i>Pyrus communis</i>	10 %	85 %	-0.88	4	Très élevé	Faible	Faible	Hôte du feu bactérien
Rutacée	<i>Phellodendron amurense</i>	85 %	15 %	-2.24	4		Élevé	Élevé	
Salicacée	<i>Populus tremula</i>	10 %	50 %	-0.68	4	Très élevé	Faible	Faible	
Salicacée	<i>Salix alba</i>	85 %	90 %	-0.90	4	Très élevé	Faible	Faible	
Sapindacée	<i>Acer campestre</i>	85 %	90 %	-0.82	4	Très élevé	Faible	Faible	
Sapindacée	<i>Acer cappadocicum</i>	90 %	55 %	-0.67	4	Moyen	Moyen	Moyen	
Sapindacée	<i>Acer x freemanii</i>	90 %	60 %	-0.34	4		Élevé	Moyen	
Sapindacée	<i>Acer negundo</i>	90 %	70 %	-0.79	4		Élevé	Moyen	Envahissant dans le Sud de la France
Sapindacée	<i>Acer platanoides</i>	10 %	70 %	-0.61	4	Élevé	Faible	Moyen	
Tiliacée	<i>Tilia cordata</i>	85 %	90 %	-0.80	4	Très élevé	Faible	Faible	
Ulmacée	<i>Ulmus laevis</i>	10 %	50 %	-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 styraciflua*) (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*

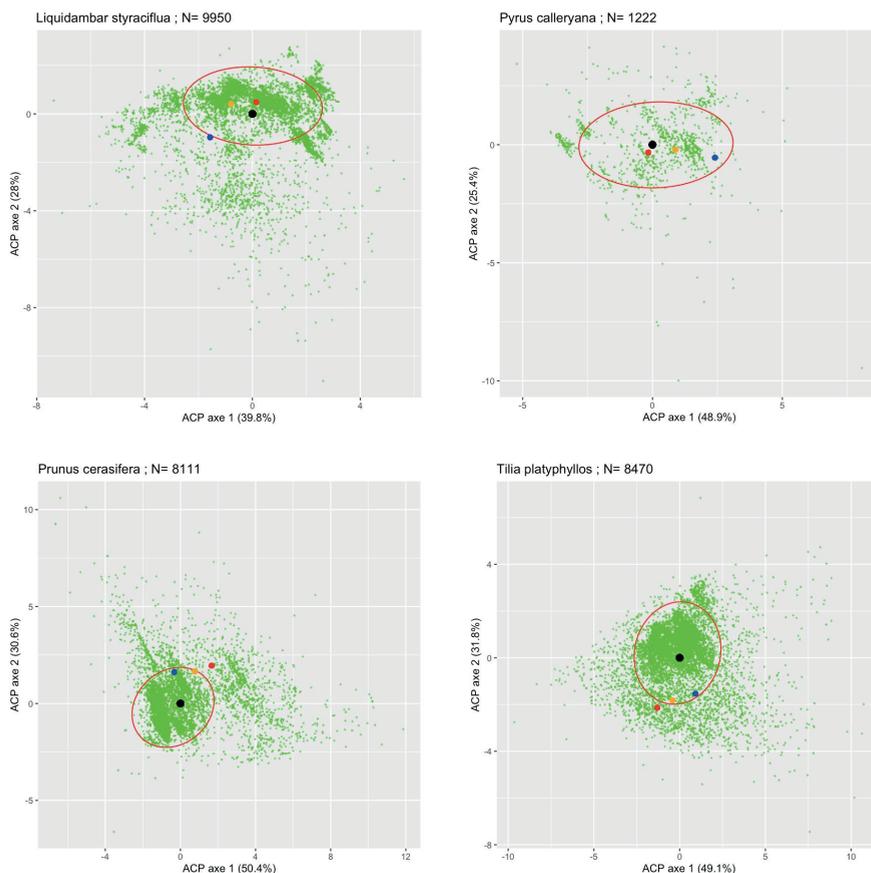


Figure 2. Niche climatique de quatre essences. Le nuage de point illustre la niche climatique sur les deux premiers axes de l'ACP avec le centre de gravité de la niche indiqué d'un point noir. Le point bleu figure le climat actuel de Lausanne, les points orange et rouges figurent le climat de Lausanne 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

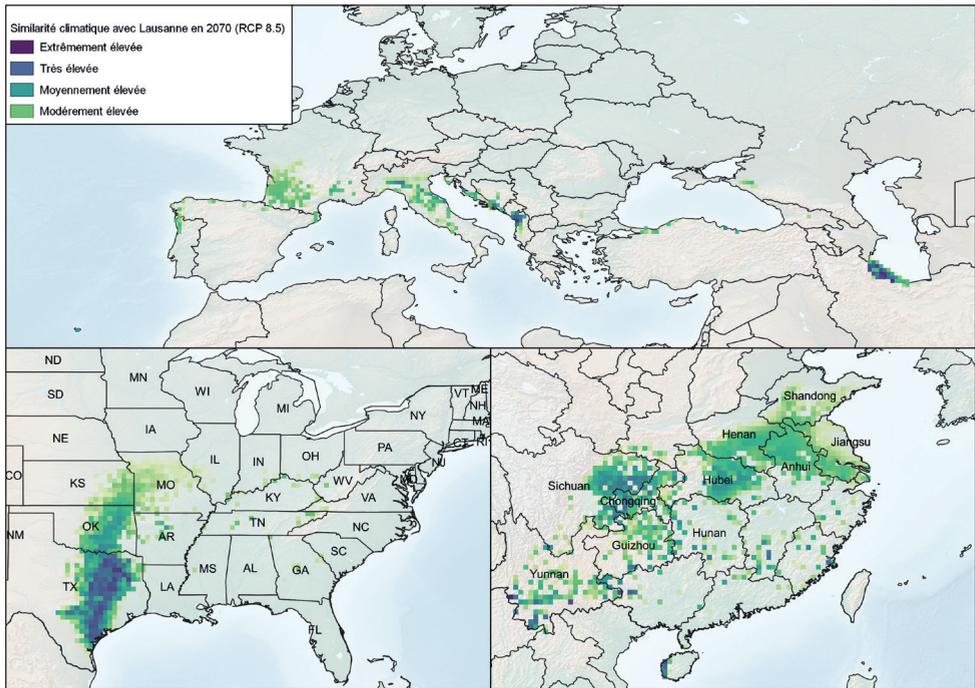


Figure 3. Similarité des climats actuels dans l'écozone holarctique avec le climat prédit pour Lausanne en 2070 (RCP8.5). La similarité est calculée comme la distance euclidienne entre le climat de Lausanne dans le scénario RCP 8.5 en 2070 et chaque point du globe sur les deux premiers axes de l'ACP.

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 pseudoplatanus*, 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 débournement. Ces deux mécanismes risquent fort de se voir perturbés dans les décennies à venir :

- le débournement 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 débournement 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 & GÖLDI-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 sténocènes 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., YOCOZ 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 Habitats 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, Hamburg, 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.
- FISOONI A., HAUTEKÈTE 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., PEÑUELAS 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.
- MARSEILLE 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.
- SCHLAEFFER M. A., GUINAUDEAU B. P., ROBERT O. & AMOS E., 2018. Projet NOS-ARBRES – Synthèse pour les instances de décision. 39 p.
- SCHMIDL 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.