



approches.
paysage

Biodiversité et services écosystémiques des arbres urbains : état des connaissances



Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Table des matières

Résumé	3
1. Contexte et objectifs	4
2. Situation de départ	5
2.1 La Suisse : un pays densément peuplé	5
2.2 Îlots de chaleur et changements climatiques dans les zones urbaines : le rôle des arbres	5
2.3 Des villes d'une biodiversité étonnamment élevée, et le rôle des arbres	5
2.4 Le rôle central des arbres dans la qualité de vie en ville	6
2.5 L'indice de canopée comme instrument de suivi	7
2.6 Les arbres comme réducteurs de l'effet des canicules	7
2.7 Le rôle sous-estimé des arbres urbains dans l'atténuation de la crise de la biodiversité	8
3. La biodiversité des arbres urbains : état des connaissances	9
3.1 Une biodiversité élevée en ville	9
3.2 L'arbre urbain comme habitat	9
3.3 L'influence des essences exotiques sur la biodiversité	10
4. Les services écosystémiques des arbres urbains	12
4.1 Bénéfices environnementaux	12
4.2 Bénéfices climatiques	12
4.3 Bénéfices sociétaux	12
4.4 Les disservices des arbres urbains	12
5. Arbres urbains et changements climatiques	15
5.1 Stratégies d'adaptation	15
5.2 Lutter contre le changement climatique	15
6. Bilan et perspectives	17
6.1 Une base scientifique solide	17
6.2 Des objectifs ambitieux nécessaires	17
6.3 Des incertitudes sur le chemin	17
7. Références	19

Mentions légales

Mandant: Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Forêts, Section Services écosystémiques forestiers et sylviculture, CH-3003 Berne. L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire: n+p biologie Sàrl, SWILD, approches. SA.

Auteur: Dr. Jérôme Pellet (direction de projet, n+p) Dr. Sandra Gloor (SWILD), Pauline Jochenbein (approches. SA), Katja Rauchenstein (SWILD), Julia Schmid (SWILD)

Accompagnement OFEV: Jean-Laurent Pfund

Remarque: La présente étude rapport a été réalisée sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Citation recommandée : n+p, SWILD, approches. 2024. Biodiversité et services écosystémiques des arbres urbains : état des connaissances. OFEV. 24 p.

Résumé

Les zones urbaines sont aujourd'hui confrontées à d'importants défis : les villes et les agglomérations sont directement touchées par le réchauffement climatique, qui accentue l'effet déjà problématique des îlots de chaleur. Dans ce contexte, les espaces ouverts et végétalisés, et en particulier les arbres, jouent un rôle crucial. Ils rafraîchissent leur environnement par l'effet combiné de l'ombrage et l'évaporation, atténuant ainsi les effets des îlots de chaleur et du réchauffement climatique. Ils contribuent en outre à la qualité de vie au travers de plusieurs autres services écosystémiques. Ceci est d'une importance capitale pour une majorité de la population suisse, car 85 % des habitants de notre pays vivent dans des zones urbaines. Comme le montrent de nombreuses études, leur bien-être et leur santé sont étroitement liés, de diverses manières, aux espaces verts urbains.

Les arbres urbains sont toutefois mis sous pression par l'imperméabilisation et le compactage des sols, la réduction du volume disponible pour les racines en raison de la présence de conduites souterraines et la forte activité de construction liée à la densification des centres-villes. À cela s'ajoutent différents facteurs de stress, comme la succession des périodes de sécheresse, de fortes pluies et de gelées tardives, ainsi que les pathogènes et autres organismes nuisibles. De nombreuses villes tentent donc de s'adapter à ces conditions difficiles en choisissant des essences adaptées au climat futur et en modifiant leurs méthodes d'entretien de l'arborisation.

Outre la crise climatique, nous sommes aujourd'hui confrontés à une deuxième crise mondiale : la crise de la biodiversité. Les villes et agglomérations étant des lieux de biodiversité étonnamment élevés, elles portent une grande responsabilité dans ce domaine. Elles abritent 45 % des espèces de plantes vasculaires indigènes et jusqu'à 67 % des espèces animales indigènes. Les arbres jouent également un rôle clé pour la biodiversité urbaine, en tant qu'habitat, refuge et fournisseur de nourriture pour la faune. Les arbres constituent en outre une partie importante de l'infrastructure écologique et contribuent de manière significative à la mise en réseau des habitats à l'intérieur des zones urbaines et avec la campagne environnante. La valeur des arbres en termes de biodiversité pour la faune et la flore dépend toutefois de leur espèce, de leur emplacement et de leur âge. Il convient donc de tenir compte de ces facteurs lors de la planification et de l'entretien du patrimoine arboré urbain.

De nombreuses villes suisses, surtout les plus grandes, ont pris conscience de l'importance et des multiples défis que pose l'arborisation urbaine et élaborent des concepts et stratégies pour répondre aux exigences d'un patrimoine arboré sain et capable de vieillir. Toutefois, les stratégies se concentrent généralement sur les espaces publics alors qu'environ la moitié des arbres se trouvent en propriété privée et sont d'égale importance pour la population. Il manque souvent les instruments nécessaires pour intégrer de manière contraignante le patrimoine arboré privé dans les stratégies. En outre, dans de nombreuses zones résidentielles, surtout de petite taille, les connaissances et l'expérience nécessaires pour réagir de manière adaptée aux défis ne sont pas encore disponibles. Des bases de données complètes ainsi qu'une coordination et un transfert de connaissances au niveau national pourraient aider les communes à planifier et à entretenir un patrimoine arboré adapté au changement climatique et à la crise de la biodiversité.

1. Contexte et objectifs

Dans le cadre du plan d'action 2021-2023 de la Stratégie pour le développement durable 2030 (SDD 2030), l'OFEV (Division Forêts — Services écosystémiques forestiers et sylviculture) a initié la mesure « Les arbres sortent du bois ». Ce projet vise à analyser le potentiel d'un concept de promotion de l'arbre hors forêt comme élément de renforcement de l'infrastructure écologique.

Ce projet s'inscrit également dans le cadre des planifications et stratégies suivantes:

- Le Plan d'action Biodiversité Suisse, notamment le projet AP SBS A2.2 "Promouvoir la biodiversité et la qualité paysagère dans les agglomérations" porté par la Division Biodiversité et Paysage;
- L'objectif 7.2 de la Stratégie Santé 2030 - le présent projet étant mentionné dans la RoadMap Santé 2030 commune à l'OFSP et l'OFEV établie en 2022;
- La Stratégie Adaptation au changement climatique 2020-2025 (mesures PA2-gb2 PA2-gb6).
- La Stratégie Sol suisse (OAT3 : "Dans les territoires urbanisés, les sols doivent remplir au mieux les fonctions importantes liées à leur emplacement, et contribuer à la qualité de vie, à l'adaptation aux changements climatiques et à la biodiversité. Le degré d'imperméabilisation est à réduire."

Pour ce faire, l'OFEV nous a mandatés afin de mettre en lumière les limites et le potentiel d'amélioration de la foresterie urbaine pour la protection de la nature et du paysage. Les arbres urbains jouent en effet un rôle crucial à plusieurs titres (OFEV 2019) :

- Renforcement de la biodiversité dans l'espace bâti ;
- Renforcement de l'infrastructure écologique (trame verte) ;
- Structuration du paysage ;
- Fourniture de services écosystémiques ;
- Outil de compensation écologique au sens de l'art. 18 al. 2 LPN.

Ce projet comporte deux volets complémentaires :

1. Une synthèse de la littérature scientifique et technique sur la contribution de l'arbre urbain à la biodiversité, à la qualité du paysage ainsi qu'au climat urbain ;
2. Une analyse des processus décisionnels d'arborisation du tissu urbain.
 - a. Évaluation de la diversité des approches de planification passées et actuelles ;
 - b. Identification des forces et faiblesses de chacune de chacune des approches ;
 - c. Formulation de recommandations pratiques pour la poursuite du processus.

Le présent rapport détaille les résultats du premier volet.

2. Situation de départ

2.1 La Suisse : un pays densément peuplé

La Suisse est l'un des pays les plus densément peuplés d'Europe. Les zones d'habitation et les surfaces d'infrastructure ne couvrent que 8 % du territoire national (16 % sur le Plateau), ce qui représente tout de même plus de 3'000 km² (OFS 2022).

Selon l'Office fédéral de la statistique (2017), 85 % de la population suisse vit actuellement dans des villes et des agglomérations. Une majorité de la population suisse est donc directement concernée par le développement des centres urbains. La qualité de vie et la santé de la population dans les zones urbanisées sont étroitement liées aux espaces verts urbains et à une nature diversifiée (Golden et al. 2015, Hornberg 2016, Ragetti et al. 2017).

2.2 Îlots de chaleur et changements climatiques dans les zones urbaines : le rôle des arbres

Dans les zones urbaines, environ 60 % de la surface est imperméable (bâtiments, routes, places, infrastructure). Comme ces surfaces imperméables s'échauffent fortement pendant la journée sous l'effet du rayonnement solaire et restituent cette chaleur pendant la nuit, des « îlots de chaleur » se forment à l'intérieur des zones bâties (Gehrig et al. 2018). Cet effet est accentué par le changement climatique, raison pour laquelle les zones urbanisées sont particulièrement touchées par le réchauffement climatique (OFEV 2018).

Les espaces verts, et en particulier les arbres, peuvent jouer un rôle de réduction de l'effet d'îlot de chaleur (Gago et al. 2013). Ainsi, les arbres et les espaces verts peuvent atténuer les effets des îlots de chaleur urbains et du réchauffement climatique et améliorer ainsi la qualité de vie de la population (Deilami et al. 2018, OFEV 2018, OFEV 2022). Dans ce contexte, les espaces verts arborés assurent un effet de refroidissement plus important que les espaces verts sans arbres (Schwaab 2021).

2.3 Des villes d'une biodiversité étonnamment élevée, et le rôle des arbres

Les villes sont des lieux d'une biodiversité relativement élevée, elle y est comparable à celle des zones rurales ou forestières (Sattler et al. 2011, Gloor et al. 2010, Obrist et al. 2012, OFEV 2017, OFEV 2023). On y trouve parfois même une biodiversité plus élevée que dans les zones environnantes soumises à une agriculture intensive (Turrini & Knop 2015). Les villes peuvent offrir des refuges et des habitats de substitution à une multitude d'espèces (oiseaux, mammifères, invertébrés, flore et cryptogames). Le tissu urbain est donc une source de biodiversité importante et sous-estimée. On estime que 45 % des espèces de plantes vasculaires indigènes et 67 % des espèces animales indigènes vivent dans les villes (Fédération suisse pour l'infrastructure communale et al. 2018).

Les arbres jouent donc un rôle clé pour la biodiversité urbaine (Fontana et al. 2011, Prevedello et al. 2017). Ils constituent un habitat et un lieu de refuge et fournissent directement et indirectement une base alimentaire à d'innombrables organismes. Les arbres constituent en outre une partie importante de l'infrastructure écologique et contribuent de manière déterminante

à la mise en réseau des habitats à l'intérieur des zones urbaines et vers la campagne environnante pour de nombreux organismes différents (Manning et al. 2006, Feber 2017).

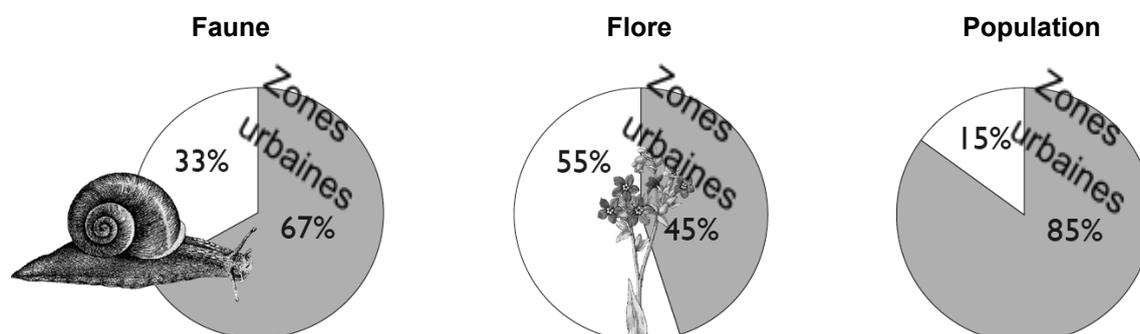


Fig. 1: Faune, flore et population dans les zones urbaines suisses (zones urbaines = gris ; zones rurales = blanc). (Association suisse d'infrastructures communales et al. 2018). Faune : 67 % de la faune suisse dans les groupes pris en compte (25'200 espèces potentielles de N tot=37'600) se trouvent dans les villes suisses (25 villes ont été étudiées). Chaque ville abrite entre 20 % et 41 % d'espèces de la faune suisse. Chaque ville abrite en moyenne 44 espèces prioritaires au niveau national (entre 24 et 113) (source Yves Gonseth, Info Fauna). Flore : environ 45 % des espèces de plantes vasculaires indigènes vivent dans les villes (source Stefan Eggenberg Info Flora). Population : 85 % de la population suisse vit aujourd'hui dans des zones urbaines (source Office fédéral de la statistique 2021).

2.4 Le rôle central des arbres dans la qualité de vie en ville

De plus en plus de grandes villes de la Suisse et d'Europe ont reconnu le rôle central des arbres pour la qualité de vie dans les agglomérations (BAFU/BAG 2019, Konijnendijk et al. 2022). Pour pouvoir planifier, conserver et entretenir de manière globale les arbres dans les zones urbaines, il faut des concepts qui englobent l'ensemble des arbres. La nécessité de tels concepts est soulignée par le fait que les zones les plus densément boisées après les forêts sont les zones urbaines (Ginzler et al. 2011).

Dans les pays anglo-saxons, le terme « Urban Forestry » a été créé à cet effet (Konijnendijk et al. 2006, Baerlocher et al. 2019). La foresterie urbaine ne s'intéresse pas seulement aux arbres urbains en particulier, mais aussi à leurs multiples interactions avec leur environnement. Tous les aspects sont pris en compte, comme la topographie, les sites, les sols et les substrats dans lesquels les arbres poussent, leur entretien, mais aussi les intérêts de la population, les aspects de planification et les conditions-cadres, etc. L'objectif est une gestion intégrale afin de garantir des arbres de grande couronne capables de vieillir (p. ex. Urbalyon 2019 ; Urban Forestry, ZHAW 2022).

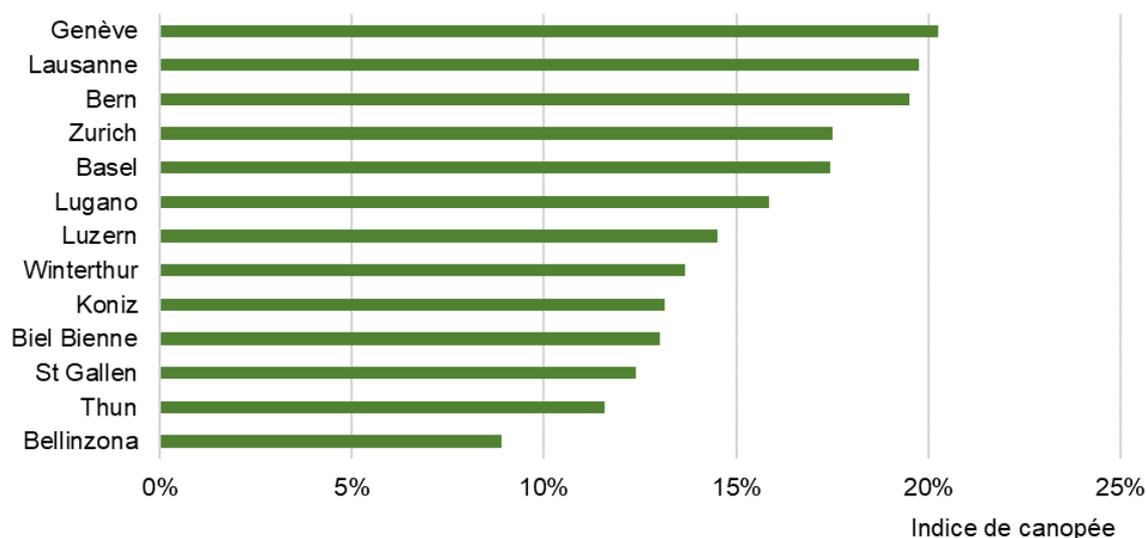


Fig. 2: Proportion du territoire couvert par des arbres de plus de 6 m dans l'espace bâti des grandes villes de Suisse. Source : n+p (2021).

2.5 L'indice de canopée comme instrument de suivi

L'un des instruments de monitoring des arbres urbains est l'indice de la canopée (la proportion d'un territoire couvert par des arbres d'une hauteur supérieure à un seuil déterminé). La célèbre organisation américaine American Forests recommande un indice de la canopée de 40 % pour les zones urbaines, ce qui est encore loin d'être le cas pour toutes les grandes villes suisses (fig. 2). L'étude « Nos arbres » réalisée à Genève (Schlaepfer et al. 2018) évoque des bénéfices importants pour la santé augmentant linéairement jusqu'à une densité de canopée de 25 %.

Cet objectif semble aujourd'hui très ambitieux, car la canopée n'a pas augmenté, mais diminué au cours de la dernière phase de recensement de 2014 à 2018 (d'environ 1 à 1,5 % par an, Grün Stadt Zürich 2021). Toutes les zones de la ville ne sont pas concernées de la même manière par cette diminution. Les espaces verts et les espaces libres garantis par le droit public et le droit de zone sont plus stables et présentent les pertes les plus faibles. Les zones résidentielles et d'activité de Zurich, c'est-à-dire les surfaces privées, sont les plus touchées par la diminution de la canopée, avec une perte relative d'environ 2 % par an entre 2014 et 2018. Grün Stadt Zürich estime qu'environ la moitié des quelque 110'000 arbres urbains hors forêt de la ville se trouvent sur des terrains privés.

2.6 Les arbres comme réducteurs de l'effet des canicules

L'urgence de la crise climatique commence à être reconnue par la société. Les administrations sont généralement conscientes du rôle important des arbres dans la réduction des îlots de chaleur urbains et de nombreuses villes se sont fixé des objectifs pour une gestion des arbres urbains adaptée au climat futur (p. ex. Dickhaut et al. 2019, Saluz et al 2021). Il faut toutefois tenir compte du fait que le choix des essences d'arbres dans les zones urbaines doit être adapté en fonction du site, compte tenu du réchauffement climatique (Roloff et al. 2009, Roloff et al. 2013, Pellet et al. 2021).

2.7 Le rôle sous-estimé des arbres urbains dans l'atténuation de la crise de la biodiversité

De manière générale, le rôle important que pourraient jouer les arbres dans les zones urbaines pour atténuer la perte de biodiversité est beaucoup moins connu que le rôle des arbres dans la réduction de la chaleur. Alors que le changement climatique est devenu l'un des principaux défis de notre époque pour les administrations et la société, la crise de la biodiversité est aujourd'hui reléguée au deuxième plan. Pourtant, le changement climatique et la perte de biodiversité constituent tous deux une menace pour l'humanité. Les deux crises sont liées, se renforcent mutuellement et doivent donc être abordées ensemble (Ismail et al. 2021).

L'indice de biodiversité des arbres urbains dans le cadre du changement climatique offre un instrument qui peut aider à intégrer la biodiversité dans le choix des espèces d'arbres sur les sites appropriés (Gloor & Göldi Hofbauer 2018, Gloor et al. 2021). Cependant, les administrations des villes et des communes ne disposent généralement pas de directives et de valeurs cibles claires, contraignantes et quantitatives concernant le choix des essences. Il en va de même pour d'autres mesures, telles que la conservation des vieux arbres, qui permettraient d'intégrer et de promouvoir la biodiversité dans les processus de planification par le biais de la conservation et de la promotion des arbres urbains.

3. La biodiversité des arbres urbains : état des connaissances

3.1 Une biodiversité élevée en ville

La biodiversité dans les agglomérations est étonnamment élevée (Kühn et al. 2004, Ives et al. 2016, Aronson et al. 2017, Lewis et al. 2019) et est principalement déterminée par deux facteurs : la superficie des habitats semi-naturels, ainsi que la densité et la diversité structurelle du patrimoine arboré (Beninde et al. 2015). Plusieurs études ont pu montrer que les habitats urbains abritent plus d'espèces végétales que le paysage environnant (Klotz, 1990 ; Pyšek, 1993 ; Araújo, 2003). Contrairement à ce qui est souvent avancé, ce ne sont pas seulement les plantes exotiques qui contribuent à cette diversité, la diversité des plantes indigènes est également significativement plus élevée dans les villes que dans les zones environnantes (Kühn et al. 2004).

Les villes sont également devenues, pour de nombreux animaux sauvages, des refuges dans un paysage culturel vidé de ses habitants et intensifié : les écosystèmes urbains abritent en conséquence une étonnante diversité d'espèces d'oiseaux et d'insectes, qui dépasse souvent la biodiversité des zones rurales (Reichholf, 2015). Des espèces rares peuvent également être présentes en grande proportion, même dans des zones fortement urbanisées (Casanelles-Abella et al., 2021a). Les écosystèmes urbains contribuent même au maintien et à la promotion de la biodiversité des abeilles sauvages : les villes sont plus chaudes, présentent une grande diversité structurelle ainsi qu'une hétérogénéité paysagère et sont moins impactées par les pesticides que l'agriculture intensive (Casanelles-Abella, 2021b). C'est peut-être la raison pour laquelle différentes études ont révélé une plus grande diversité d'espèces d'abeilles sauvages dans les zones urbaines que dans les zones agricoles, l'habitat urbain constitue un habitat de substitution pour les insectes (Baldock et al. 2015, Reichholf, 2015).

3.2 L'arbre urbain comme habitat

Les arbres jouent un rôle décisif pour la biodiversité dans les zones urbaines, comme le montrent de nombreuses études internationales (Wood & Esaian, 2020, O'Sullivan et al. 2017, Threlfall et al. 2017, Baldock et al. 2015, Obrist et al. 2012). Aucune autre forme de plante n'est aussi diversifiée que l'arbre et n'offre autant de niches écologiques différentes. Il constitue un habitat, un lieu de refuge, offre une protection et une base alimentaire. Les vieux arbres sont considérés comme particulièrement précieux pour la biodiversité, car ce n'est qu'à partir d'un certain âge que des micro-habitats tels que les trous de branches apparaissent (Le Roux et al. 2018). L'habitat de l'arbre ne se limite toutefois pas au tronc et à la couronne. Ce n'est que dans sa globalité, avec le sol et la strate herbacée à son pied, que la diversité des groupes d'espèces tels que les arthropodes, les oiseaux, les mammifères, les mousses, les lichens et les mycorhizes peuvent utiliser cet habitat.

De nombreux insectes dépendent en particulier de la végétalisation au pied des arbres comme habitat partiel. Une étude a démontré que la bande végétalisée sous les arbres contribue à abriter une grande diversité des espèces d'abeilles sauvages, en plus des arbres avec leur capacité à fournir de l'ombre et de la nourriture (Heinricht & Saluz 2017, Böll et al. 2019).

En ville, les arbres représentent un espace vert central et souvent unique. De nombreuses essences différentes d'arbres apportent une contribution essentielle à la biodiversité (Dickhaut &

Eschenbach et al., 2019). Différentes études attribuent une valeur particulièrement élevée aux arbres hors forêt, car ces arbres isolés forment des passerelles au cœur des villes, augmentant la connectivité des espaces verts et facilitant les échanges génétiques (Manning et al. 2006 ; Le Roux et al. 2018 ; Prevedello et al. 2017).

3.3 L'influence des essences exotiques sur la biodiversité

L'habitat urbain, comme de nombreux paysages influencés par l'homme, est caractérisé à la fois par des espèces d'arbres et d'animaux indigènes et exotiques. Ces dernières peuvent avoir un impact négatif sur l'écosystème urbain en modifiant les interactions naturelles entre les espèces et les fonctions importantes de l'écosystème. En même temps, elles peuvent combler des niches écologiques, prendre le rôle d'espèces disparues localement et fournir des services écosystémiques (Finerty et al. 2016; Gray et van Heezik 2016, Schlaepfer et al. 2020).

L'étude de Böll et al. (2019) a examiné dans quelle mesure des espèces d'arbres indigènes et exotiques proches influencent la diversité des arthropodes en milieu urbain dans différentes villes de Bavière. Trois paires d'essences différentes (tilleul à petites feuilles/tilleul argenté, frêne commun/frêne à fleurs, charme/houblon) ont été comparées. Toutes les espèces d'arbres présentaient une richesse d'individus et d'espèces inattendue. Un nombre nettement plus élevé d'individus a été capturé sur les essences indigènes, mais pas pour tous les taxons d'arthropodes étudiés. Les espèces d'arbres du sud-est de l'Europe ne se distinguaient en outre pas de leurs espèces indigènes apparentées en termes de diversité d'espèces d'invertébrés. La majorité des espèces ont été trouvées dans les deux groupes d'essences, un tiers uniquement sur les arbres indigènes et un quart exclusivement sur les essences du sud-est de l'Europe (Fig. 1). Comme plus de la moitié des espèces ne se trouvaient que sur l'un des deux groupes d'arbres, la plus grande biodiversité d'arthropodes résulte d'une plantation mixte des essences étudiées.

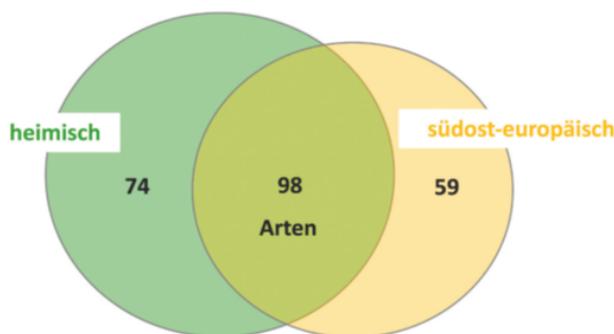


Fig. 3 : Présence d'espèces de taxons dominants sur des groupes d'essences indigènes (heimisch), d'Europe du Sud-Est (südost-europäisch) ou sur les deux groupes d'essences (Böll et al. 2019).

Une étude de Casanelles-Abella et al. (2021a), portant sur la nourriture des abeilles sauvages le long d'un gradient d'urbanisation, a révélé les différentes stratégies des abeilles sauvages urbaines. Certaines espèces sont des généralistes à large spectre, d'autres généralistes intermédiaires alors que certaines sont des spécialistes sur des plantes urbaines largement répandues. Chez une espèce, on a même constaté une transition de la recherche de pollen des plantes herbacées vers les arbres : plus le milieu est urbanisé, plus le pollen est prélevé sur les arbres.

Les espèces d'arbres indigènes et exotiques se sont révélées être des ressources polliniques largement répandues (Casanelles-Abella et al. 2021a). Une étude de l'influence du robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*) invasif sur les arthropodes a montré que l'invasion de cette essence pouvait contribuer à des fluctuations d'espèces, mais n'avait pas d'impact significatif sur l'abondance ou la diversité des invertébrés terrestres (Buchholz et al. 2015).

Des différences entre les essences exotiques et indigènes ont toutefois été constatées chez les espèces de coléoptères saproxyliques, pour lesquelles la richesse en espèces était moindre chez les essences exotiques. La diversité locale des coléoptères saproxyliques est particulièrement réduite chez les espèces d'arbres très éloignées (Kärvemo et al. 2022).

3.4 La valeur de la diversité

Selon le groupe d'espèces, on observe des résultats différents en ce qui concerne la préférence des essences indigènes par rapport aux essences exotiques, un grand nombre d'arthropodes étant présents aussi bien sur des essences indigènes que sur des essences exotiques (Kärvemo et al. 2022, Casanelles-Abella et al. 2021, Böll et al. 2019). Cependant, seuls un nombre limité de groupes d'animaux et une petite sélection d'essences différentes ont été étudiés jusqu'à présent, laissant beaucoup de place à la spéculation.

Parallèlement, le choix d'essences indigènes peut être trop restreint pour continuer à fournir les services écosystémiques dans des conditions climatiques modifiées et dans un environnement urbain difficile (Sjöman et al. 2016).

La création d'allées mixtes composées d'essences indigènes et bien adaptées au climat, avec une sous strate buissonnante et herbacée diversifiée, offre à la faune urbaine une multitude d'habitats et de refuges et augmente le potentiel de biodiversité. La diversité des espèces d'arbres à l'échelle de la ville permet en outre de réduire les risques liés au climat et aux parasites. Ceci se traduit par un écosystème urbain plus résilient et pouvant être un refuge pour les espèces animales malgré le degré d'urbanisation élevé.

4. Les services écosystémiques des arbres urbains

Les services écosystémiques décrivent les services fournis par la nature et utilisés par les humains. Les arbres urbains fournissent une série de services écosystémiques, qui sont répartis et décrits plus en détail ci-dessous selon les 3 types de bénéfices illustrés plus bas (Fig. 4).

4.1 Bénéfices environnementaux

Les arbres offrent un habitat à un grand nombre d'espèces et jouent un rôle important pour la biodiversité dans les zones urbaines (plus d'informations à ce sujet au chapitre 2). Parallèlement, ils offrent de la nourriture à la faune urbaine (Somme et al. 2016, Wood & Esaian 2020) et peuvent servir d'axe de liaison entre les habitats (Manning et al. 2006, Feber 2017).

Des études ont montré que les essences exotiques fournissent des services écosystémiques à peu près identiques à ceux des essences indigènes (Sjöman et al. 2016, Schlaepfer et al. 2020), car leur attractivité est principalement liée aux caractéristiques morphologiques des arbres.

4.2 Bénéfices climatiques

En stockant du CO₂, en transpirant de l'eau et en offrant de l'ombre (plus d'informations à ce sujet au chapitre 4), les arbres urbains sont un moyen d'atténuer le changement climatique et ses effets négatifs (Ariluoma et al. 2021, Nowak et al. 2013, Strohbach et al. 2012). En outre, les arbres et les espaces verts, dont le sol est perméable, peuvent absorber des quantités considérables d'eau de pluie et la stocker dans le sol, contribuant ainsi à améliorer le cycle de l'eau et à atténuer localement les risques d'inondation (Bartens et al. 2009, BAFU 2020, Pataki et al. 2021). En outre, les arbres contribuent à atténuer le bruit de la circulation routière (Fern Ow et Ghosh, 2017).

Dans certaines conditions, les arbres urbains contribuent à améliorer la qualité de l'air en ville en absorbant les polluants atmosphériques tels que le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone, le dioxyde de soufre (SO₂), les composés organiques volatils (COV) et les particules fines (Nowak et al. 2019). Selon l'endroit, il convient toutefois de tenir compte du fait que les arbres peuvent réduire la circulation de l'air et que les polluants atmosphériques peuvent ainsi se concentrer localement (Eisenmann et al. 2019).

4.3 Bénéfices sociétaux

Les espaces verts urbains ont une grande valeur pour la population. L'accès aux espaces verts urbains peut offrir des possibilités de détente qui, à leur tour, peuvent favoriser la santé physique et la cohésion sociale (Nesbitt et al. 2017, Salmond et al. 2016, BAFU/BAG 2019, Astell-Burt & Feng 2019). De plus, les espaces verts ont une influence positive sur la santé mentale des habitants (Marselle et al. 2020, Olszewska-Guizzo et al. 2022). Des études ont en outre montré que les arbres présents dans les environs et sur les terrains privés augmentent leur valeur de vente (Arbor Day Foundation, 2021), apportent une plus-value esthétique et peuvent marquer positivement l'image du lieu (Collins et al. 2019).

4.4 Les disservices des arbres urbains

En sus des services écosystémiques mentionnés ci-dessus, que les arbres fournissent dans les zones urbaines, ils peuvent également présenter certains aspects négatifs d'un point de vue anthropocentrique. Les personnes asthmatiques et allergiques peuvent souffrir du pollen de différentes espèces d'arbres (en particulier le bouleau, l'aulne, le noisetier, le châtaignier ou le

platane). En outre, certaines espèces d'arbres peuvent générer des composés organiques volatils (COV) en période de canicule et augmenter ainsi la concentration d'ozone (Churkina et al. 2017, Eisenmann et al. 2019).

De plus, en cas d'intempéries, de tempêtes de vent et de fortes chutes de neige, les arbres représentent un certain danger pour les passants et les infrastructures sous forme de chutes de branches ou de chablis. Notons encore que les essences non indigènes fournissent à peu près autant de services écosystémiques négatifs que les espèces indigènes (Schlaepfer et al. 2020).

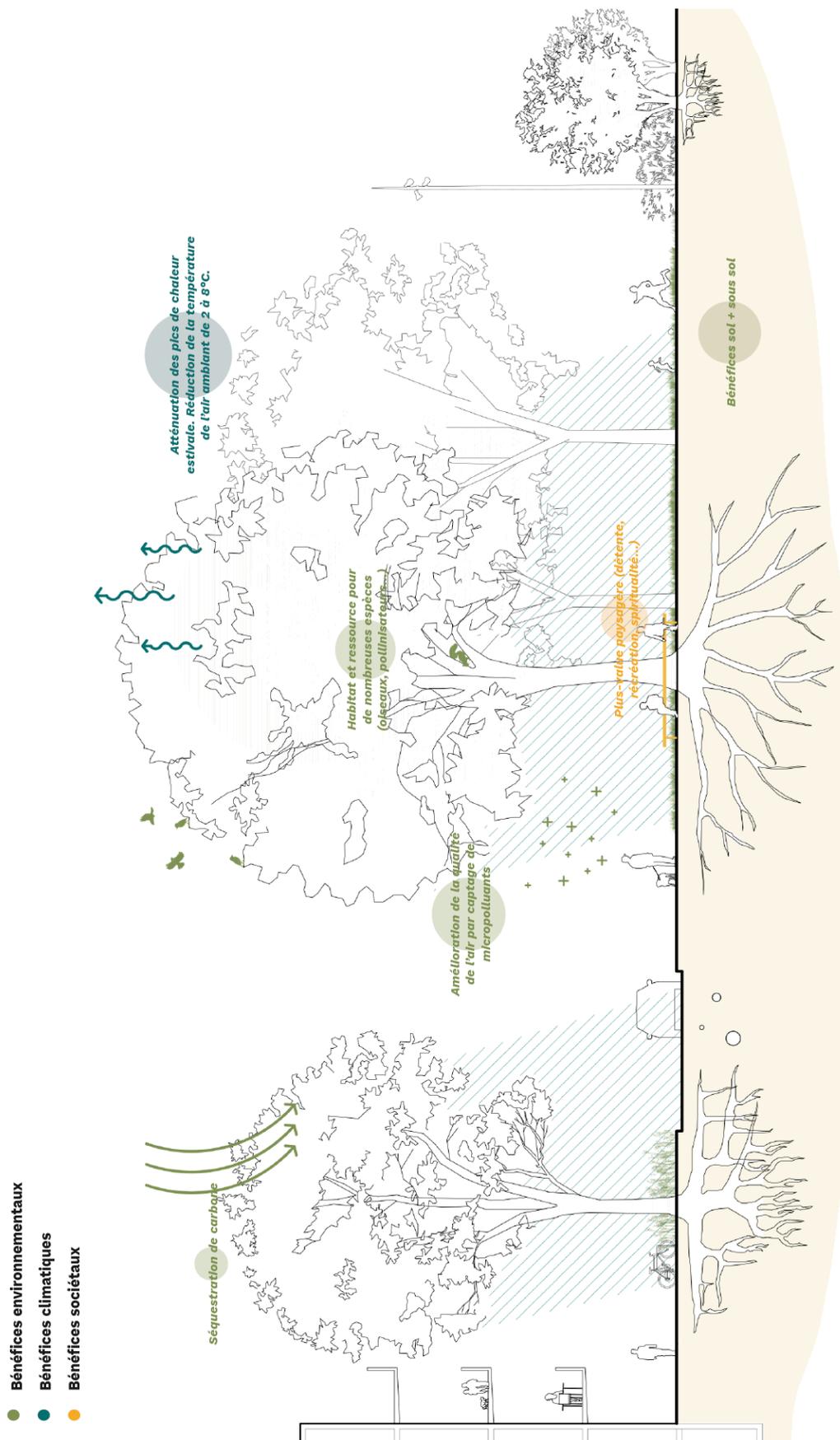


Fig. 4 : Les services écosystémiques de l'arborisation urbaine. Source : Hüsler & associés, n+p (2021).

5. Arbres urbains et changements climatiques

5.1 Stratégies d'adaptation

Le changement climatique rend les jours de canicule nettement plus fréquents et encore plus marqués dans les zones urbaines en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain (OFEV 2018, Deilami et al. 2018). Dans ce contexte, les villes se réchauffent plus vite pendant la journée et se refroidissent plus lentement pendant la nuit. Dans les centres-villes suisses, la température moyenne de l'air est supérieure de 1 à 3°C aux valeurs des régions environnantes. Pendant les nuits d'été peu venteuses avec un ciel sans nuages, cette différence entre la périphérie et le centre-ville peut même dépasser 6 à 8°C, voire plus dans certains cas (OFEV 2018, Gehrig et al. 2018).

Les surfaces végétalisées et les sols perméables peuvent contrecarrer les îlots de chaleur urbains (Tervooren 2015, Barradas et al. 2022, Koopman & Davin 2022). Les arbres urbains contribuent à faire baisser les températures localement par la transpiration et l'ombrage porté (Blaser et al. 2016, Bowler et al. 2010, Edmondson et al. 2016). En particulier, les arbres à grande couronne et les grandes surfaces non imperméabilisées contribuent à améliorer le microclimat local (Ziter et al. 2019). En outre, les bandes de végétation à travers la ville et les espaces verts en périphérie permettent d'améliorer considérablement l'apport d'air frais provenant des environs ainsi que le renouvellement de l'air (Dickhaut et al. 2019).

De plus, les arbres urbains peuvent contribuer à réduire les dommages causés par les inondations dues à de fortes pluies en stockant temporairement l'eau de pluie excédentaire dans les fosses de plantation et en l'évaporant ultérieurement (OFEV/ARE 2022).

Pour préserver le patrimoine arboré des villes et donc les fonctions souhaitées à l'avenir, il faut, lors des nouvelles plantations, des espèces et des variétés d'arbres robustes, capables de faire face aux facteurs de stress spécifiques à la ville ainsi qu'aux défis du changement climatique (Böll et al. 2019, Pellet et al. 2021).

5.2 Lutter contre le changement climatique

Les arbres contribuent à l'atténuation du changement climatique grâce à leur capacité à stocker le CO₂ atmosphérique (Ariluoma et al. 2021, Nowak et al. 2013, Strohbach et al. 2012). L'estimation du carbone stocké dans les arbres urbains est encore soumise à de grandes incertitudes et les résultats varient selon le contexte géographique et la méthode d'étude. Ainsi, des études menées par Gardi et al. (2016) dans la ville de Berne ont révélé que la biomasse arborée aérienne stockait en moyenne 14,9 ± 0,5 tonnes de carbone par hectare. Une autre étude menée à l'échelle de la Suisse est parvenue à des quantités de carbone stocké nettement plus importantes, avec 20 et 48 tonnes de carbone par hectare (Price et al. 2017). Une étude menée aux États-Unis sur 28 villes a estimé la valeur moyenne du carbone stocké dans les arbres urbains à 76,9 tonnes par hectare (Nowak et al. 2013).

Comparée aux émissions de CO₂ générées par les villes, la capacité de stockage des arbres est plutôt faible (Nowak et al., 2013, Velasco et al. 2016, Pataki et al. 2021). La croissance annuelle des arbres urbains ne peut généralement compenser que 0 à 3 % des émissions de CO₂ urbaines (Linden et al. 2020, Pataki et al. 2009, Pataki et al. 2021, Velasco et al. 2016). Cependant, des études intéressantes menées à Helsinki montrent que les arbres et l'incorporation de charbon végétal dans le substrat de culture peuvent augmenter considérablement le stockage et la séquestration du carbone et que le charbon végétal assure

en outre des conditions de croissance favorables (Ariluoma et al. 2021, Pataki et al. 2021). Un projet de recherche actuel de la ZHAW à Wädenswil, en collaboration avec la ville de Bâle, s'intéresse également à l'effet du substrat enrichi en charbon végétal sur la vitalité des plantations d'arbres, mais les résultats ne sont pas encore disponibles.

Le développement des espaces verts urbains peut en outre contribuer indirectement à la protection du climat en réduisant potentiellement les investissements dans des activités à forte émission de carbone telles que la construction d'infrastructures grises (Ottelin et al. 2018). En outre, la qualité perçue de l'environnement résidentiel peut s'en trouver améliorée, ce qui peut inciter la population à passer plus de temps dans son environnement résidentiel et à effectuer moins de trajets à forte intensité de CO₂ vers les espaces verts (Reichert et al. 2016).

6. Bilan et perspectives

6.1 Une base scientifique solide

La contribution des arbres à la biodiversité urbaine est largement reconnue et a été démontrée à de multiples reprises. Des lichens aux champignons, en passant par la flore, les invertébrés ou les oiseaux, il ne fait aujourd'hui aucun doute que l'arbre urbain contribue à renforcer significativement la diversité du vivant dans les espaces bâtis.

Le rôle des arbres isolés hors forêt est également fondamental dans le maintien d'une trame écologique à l'échelle des territoires. Ils contribuent à la perméabilité du territoire pour la faune et la flore et sont des éléments charnières de l'infrastructure écologique et de la structuration du paysage.

Leur rôle dans l'espace urbain est plus grand que ce qui serait attendu par rapport à l'espace qu'ils occupent. Les multiples services écosystémiques qu'ils offrent à la population urbaine dépassent de loin les quelques désagréments qu'ils peuvent occasionner.

6.2 Des objectifs ambitieux nécessaires

Malgré cette situation favorable à l'arbre urbain, force est de constater que l'arborisation régresse dans la plupart des agglomérations du pays. Pour l'ensemble des raisons évoquées plus haut, de nombreuses communes se sont fixé des objectifs de renforcement de leur indice de canopée pour le milieu du siècle (Tableau 1).

Année	Genève	Lausanne	Zurich
2022	22 %	20 %	17 %
2030	25 %		
2040		30 %	
2050			25 %

Tab. 1 : Objectifs de canopée de 3 grandes villes (source RTSinfo)

De manière assez uniforme, les villes visent des couvertures de canopée entre 25 et 30 %, cette valeur étant celle jugée nécessaire pour que les arbres urbains déploient efficacement l'ensemble de leurs services écosystémiques, y compris celui de renforcement de la biodiversité (Grün Stadt Zürich 2021). Ces objectifs de canopée se traduisent par des objectifs de plantation annuels extrêmement ambitieux (entre 500 et 1'500 arbres à planter par année) et difficile à mettre en œuvre (financement, ressources humaines pour la plantation et le suivi, disponibilité en pépinière, disponibilité foncière ou du sol), sans compter la difficulté à maintenir le patrimoine boisée existant à long terme.

6.3 Des incertitudes sur le chemin

Pour atteindre les objectifs de renforcement de la canopée, plusieurs étapes doivent être franchies par les collectivités, chacune avec leur lot d'incertitudes :

1. **Développer la connaissance du patrimoine arboré** (carte des sols perméables, couverture de canopée, cadastre des arbres sur le domaine privé et public). Sans ces

bases, souvent manquantes dans les petites communes, les collectivités travaillent à l'aveugle et ne peuvent pas déployer des politiques efficaces.

2. **Mettre en place les instruments permettant de protéger l'existant et de conserver en particulier les vieux arbres en place.** Les vieux arbres (ou arbres vétérans) jouent un rôle primordial pour la biodiversité. L'abondance de micro-habitats qu'ils abritent en font des habitats uniques pour de nombreuses espèces exigeantes.
3. **Planter la bonne essence au bon endroit.** Cette étape nécessite une réflexion approfondie afin de choisir des essences à fort potentiel de biodiversité, résistantes au climat futur auquel elles devront faire face et adaptées au sol et à l'environnement dans lequel elles devront croître.
4. **Garantir de bonnes conditions de croissance.** L'espace urbain n'est pas pensé pour l'arbre. Il n'est souvent vu que comme une décoration urbaine, un apport esthétique. Les volumes de plantation insuffisants et les contraintes techniques souterraines entravent le libre développement des racines, préterrant sérieusement l'avenir et la longévité de l'arbre. L'arbre a besoin d'espace, dans le sous-sol et dans l'air.
5. **Gérer pour pérenniser.** Pour que l'arbre déploie sa valeur, il doit pouvoir se développer librement et longtemps. Les tailles régulières, l'absence de suivi, les atteintes à son tronc, ses racines et ses branches sont autant de stress qui réduisent son espérance de vie. L'évolution rapide des usages et affectations du sol ne laisse pas le temps aux arbres d'atteindre leur plein potentiel (abattages prématurés). De profondes modifications des pratiques sont aujourd'hui nécessaires.

Aujourd'hui, les connaissances scientifiques sont suffisantes pour justifier d'ambitieuses politiques d'arborisation urbaines. Les facteurs limitants se trouvent essentiellement dans les instruments réglementaires et techniques de mise en œuvre de ces politiques. Ces aspects font l'objet du second volet du présent projet.

7. Références

- Araújo, M.B. 2003. The coincidence of people and biodiversity in Europe. *Global Ecol. Biogeogr.* 12: 5–12.
- Arbor Day Foundation. 2021. Economics of urban forestry in the United States. Arbor Day Foundation et al., Lincoln, Nebraska. <https://www.arborday.org/urban-forestry-economic/>.
- Ariiluoma M., Ottelin J., Hautamäki R., Tuhkanen E.M., Mänttari, M. 2021. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki. *Urban Forestry and Urban Greening*, 57, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126939>.
- Aronson, Myla FJ; Lepczyk, Christopher A; Evans, Karl L; Goddard, Mark A; Lerman, Susannah B; MacIvor, J Scott; Nilon, Charles H; Vargo, Timothy (2017). Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, doi:10.1002/fee.1480
- Bartens, J., Day, S.D., Harris, J.R. et al. 2009. Transpiration and Root Development of Urban Trees in Structural Soil Stormwater Reservoirs. *Environmental Management* 44, 646–657. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9366-9>.
- BAFU/BAG (Hrsg.). 2019: Umwelt und Gesundheit in der Schweiz. Eine facettenreiche Beziehung. Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Gesundheit, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1908: 61 p.
- BAFU 2020. Bodenstrategie Schweiz, für einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden. Schweizerischer Bundesrat (Hrsg.). Umwelt-Info 2018-d. 69 p.
- BAFU 2021. Taschenstatistik der Schweiz 2021. 29 Seiten. <https://www.swissstats.bfs.admin.ch/>
- BAFU 2022a. Bäume ausserhalb des Waldes - Urbane Forstwirtschaft und Agroforstwirtschaft. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/fachinformationen/waldbewirtschaftung/urbane-forstwirtschaft-agroforstwirtschaft.html> (Consultation du site web 15.12.2022).
- BAFU 2022b: Biodiversität und Landschaftsqualität im Siedlungsgebiet. Empfehlungen für Musterbestimmungen für Kantone und Gemeinden. Bundesamt für Umwelt. 57 p.
- BAFU/ARE 2022: Regenwasser im Siedlungsraum. Starkniederschlag und Regenwasserbewirtschaftung in der klimaangepassten Siedlungsentwicklung. Bundesamt für Umwelt (BAFU); Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). Umwelt-Wissen Nr. 2201: 115 p.
- Confédération Suisse 2020: Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Plan d'action 2020–2025, Berne, 164 p.
- Baerlocher, B., Wilkes-Allemann, J., Heinrich, A., Schlaepfer, M., Guinaudeau, B., Robert, O. and Amos, E., 2019. Was ist Urban Forestry? Beispiele aus der Schweiz. *Anthos*, 58: 32-36.
- Baldock, K.C.R., Goddard, M.A., Hicks, D.M. et al. 2015. Where is the UK's pollinator biodiversity? The importance of urban areas for flower visiting insects. *Proc. R. Soc. B* 282 : 20142849.
- Barradas, V.L., Miranda, J.A., Esperón-Rodríguez, M., Ballinas, M. 2022. (Re)Designing Urban Parks to Maximize Urban Heat Island Mitigation by Natural Means. *Forests*, 13, 1143. <https://doi.org/10.3390/f13071143>.
- Beninde J., Veith M., Hochkirch A. 2015. Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology Letters* 18: 581-592.
- Blaser J., Gardi O., Kern M., Mack S., Wiedemar M., Remund J. 2016. Schlussbericht Urban Green & Climate Bern - Die Rolle und Bewirtschaftung von Bäumen in einer

- klimaangepassten Stadtentwicklung. Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, 62 p.
- Böll, V.S., Mahsberg, D., Albrecht, R., Peters, M.K. 2019. Urbane Artenvielfalt fördern. Naturschutz und Landschaftsplanung, 51, 12.
- Bowler D.E., Buyung-Ali L., Knight T. M., Pullin A.S. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97 (3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>.
- Buchholz S., Tietze H., Kowarik I., Schirmel J. 2015. Effects of a Major Tree Invader on Urban Woodland Arthropods. *PLoS ONE* 10(9): e0137723.
- Casanelles-Abella, J., Chauvier, Y., Zellweger, F., Villiger, P., Frey, D., Ginzler, C., Moretti, M., Pellissier, L. 2021a. Applying predictive models to study the ecological properties of urban ecosystems: A case study in Zurich. Switzerland. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104137. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104137>
- Casanelles-Abella, J., Müller, S., Keller, A., Aleixo, C., Alós Orti, M., Chiron, F., Deguines, N., Hallikma, T., Laanisto, L., Pinho, P., Samson, R., Tryjanowski, P., Van Mensel, A., Pellissier, L., Moretti, M. 2021b. How wild bees find a way in European cities: Pollen metabarcoding unravels multiple feeding strategies and their effects on distribution patterns in four wild bee species. *Journal of Applied Ecology*, 59, 457–470. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14063>
- Churkina G., Kuik F., Bonn B., Lauer A., Grote R., Tomiak K., Butler T.M. 2017. Effect of VOC Emissions from Vegetation on Air Quality in Berlin during a Heatwave. *Environ. Sci. Technol.* 51(11): 6120-6130.
- Collins C.M.T., Cook-Monie I., Raum S. 2019. What do people know? Ecosystem services, public perception and sustainable management of urban park trees in London, U.K. *Urban Forestry & Urban Greening*. 43. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.06.005>.
- Conseil Fédéral 2020. Stratégie Sol Suisse pour une gestion durable des sols. 69 p.
- Conseil Fédéral 2020. Politique de la santé: stratégie du Conseil fédéral 2020-2030. 34 p.
- Deilami K., Kamruzzaman M, Liua Y. 2018. Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 67: 30-42.
- Dickhaut, W., Doobe, G., Eschenbach, A., Fellmer, M., Gerstner, J., Gröngroft, A., Winkelmann, A. 2019. Entwicklungskonzept Stadtbäume. Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen. Hafencity Universität Hamburg.
- Edmondson, J., Stott, I., Davies, Z. et al. Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Sci Rep* 6, 33708 2016. <https://doi.org/10.1038/srep33708>
- Eisenmann S.T., Churkina G., Jariwala S.P., Prashant Kt, Lovasi G.S., Pataki D.E., Weinberger K.E., Whitlow T.H. 2019. Urban trees, air quality, and asthma: An interdisciplinary review. *Landscape and Urban Planning*, 187, 47-59. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.02.010
- Feber R. 2017. The role of trees outside woods in contributing to the ecological connectivity and functioning of landscapes. Woodland Trust Research Report. 23 p.
- Fern Ow L., Ghosh S., 2017. Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. *Applied acoustics*. 120. 15-20.
- Finerty G.E, de Bello F., Bila K., Berg M.P., Dias A.T.C., Pezzatti G.B., Moretti M. 2016. Exotic or not, leaf trait dissimilarity modulates the effect of dominant species on mixed litter decomposition. *J Ecol* 104:1400–1409.

- Fontana S., Sattler T., Bontadina F., Moretti, M. 2011. How to manage the urban green to improve bird diversity and community structure. *Landsc. Urban Plan.*101(3), 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.033>
- Gago, E.J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R. and Ordóñez, J., 2013. The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, pp.749-758.
- Gardi O., Schaller G., Neuner M., Mack S. 2016. Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Siedlungsgebiet am Beispiel der Stadt Bern. *Schweiz Z Forstwes* 167. 2: 90 – 97.
- Gehrig R., König, N., Scherrer, S. 2018. Städtische Wärmeinsel in der Schweiz – Klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten, *Fachbericht MeteoSchweiz*, 273, 61 p.
- Ginzler C., Mathys, L., Thürig E. 2011. Die Baumbedeckung in der Schweiz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 162(9): 344–349.
- Gloor S., Moretti M., Bauer, N., Bontadina F., Della Bruna P. & Duelli P. 2010. BiodiverCity: Biodiversität im Siedlungsraum. Zusammenfassung. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Gloor S., Göldi Hofbauer M. 2018. Der ökologische Wert von Stadtbäumen bezüglich der Biodiversität. In: D. Dujesiefken (ed.), *Jahrbuch der Baumpflege 2018*. Jahrgang 22, Haymarket Media: Braunschweig.
- Gloor S., Taucher A., Rauchenstein K. 2021. Biodiversitätsindex 2021 für Stadtbäume im Klimawandel. SWILD Zürich. Grün Stadt Zürich, interner Bericht, 58 p.
- Golden Christopher D., Romanelli C. et al. 2015. Connecting Global Priorities: Biodiversity and Human Health, a State of Knowledge Review. World Health Organization and Secretariat for the Convention on Biological Diversity. 360 p.
- Gray E. R. & Van Heezik Y. 2016. Exotic trees can sustain native birds in urban woodlands. *Urban Ecosystems* 19: 315-329.
- Grün Stadt Zürich (Hrsg.). 2021. *Fachplanung Stadtbäume*. Zürich, 61 p.
- Heinrich, A., & Saluz, A. G. (2017). Die Logik der "Gehölzbetonten Pflanzensysteme": Unterpflanzungen fördern Vitalität von Straßenbäumen. *Stadt + Grün*, 2017(3), 25–30.
- Hornberg C. 2016. Stadtnatur fördert die Gesundheit. In *Ökosystemleistungen in der Stadt – Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen*. (Eds. Kowarik I, Bartz R, Brenck M) 98 – 125 Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung — UFZ. Berlin, Leipzig.
- Ismail S.A., Geschke J., Kohli M. et al. 2021. Klimawandel und Biodiversitätsverlust gemeinsam angehen, *Swiss Academies Factsheet* 16 (3).
- Ives, Christopher D.; Lentini, Pia E.; Threlfall, Caragh G.; Ikin, Karen; Shanahan, Danielle F.; Garrard, Georgia E.; Bekessy, Sarah A.; Fuller, Richard A.; Mumaw, Laura; Rayner, Laura; Rowe, Ross; Valentine, Leonie E.; Kendal, Dave (2016). Cities are hotspots for threatened species. *Global Ecology and Biogeography*, 25(1), 117–126. doi:10.1111.
- Kärvemo, S., Schroeder, M., Ranius, T. 2022. Beetle diversity in dead wood is lower in non-native than native tree species, especially those more distantly related to native species. *Journal of Applied Ecology*.
- Klotz, S. 1990. Species/area and species/inhabitants relations in European cities. In *Urban Ecology: Plants and Plant Communities in Urban Environments* (H. Sukopp and S. Hejný, eds.), pp. 99–103. The Hague: SPB Academic Publishing.
- Konijnendijk C.C., Ricard R. M., Kenney A. and Randrup T.B., 2006. Defining urban forestry—A comparative perspective of North America and Europe. *Urban forestry & urban greening*, 4: 93-103.

- Konijnendijk C.C., Bernasconi A., Eggenberger T., Juchli J. Trees outside forests - Values and Services (TREEVES). Review and Perspective for Switzerland. Bericht im Auftrag des BAFU, 76 p.
- Koopmans M. & Davin E. 2022. Urban trees and green spaces for climate-resilient cities in Switzerland. Wyss Academy for Nature at the University of Bern. 12 p.
- Kühn, I., Brandl, R., Klotz, S. 2004. The flora of German cities is naturally species rich. *Evolutionary Ecology Research*, 6/2004, 749-764.
- Le Roux D.S., Ikin K., Lindenmayer D.B., Manning A.D., Gibbons P. 2018. The value of scattered trees for wildlife: Contrasting effects of landscape context and tree size. *Diversity and Distribution* 24: 69-81.
- Lewis, A.D., Bouman, M.J., Winter, A.M., Hasle, E.A., Stotz, D.F., Johnston, M.K., Klinger, K.R., Rosenthal, A., Czarnecki, C.A., 2019. Does nature need cities? Pollinators reveal a role for cities in wildlife conservation. *Front. Ecol. Evol.* 7 (June), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00220>.
- Lindén L., Riikonen A., Setälä H., Yli-Pelkonen, V. 2020. Quantifying carbon stocks in urban parks under cold climate conditions. *Urban For. Urban Green.* 49:126633. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126633
- Manning A.D., Fischer J., Lindenmayer D.B. 2006. Scattered trees are keystone structures – Implications for conservation. *Biological Conservation* 132: 311-321.
- Marselle, M.R., Bowler, D.E., Watzema, J. et al. 2020. Urban street tree biodiversity and antidepressant prescriptions. *Sci Rep* 10, 22445. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79924-5>
- Nesbitt L., Hotte N., Barron S., Cowan J., Sheppard S.R.J. 2017. The social and economic value of cultural ecosystem services provided by urban forests in North America: A review and suggestions for future research. *Urban Forestry & Urban Greening.* 25. 103-111. doi.org/10.1016/j.ufug.2017.05.005
- Nowak, D.J., Greenfield, E.J., Hoehn, R.E., Lapoint, E. 2013. Carbon sequestration and storage by trees in urban and community areas of the United States. *Environ. Pollut.* 178, 229–236.
- Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., Pasher, J. 2018. Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban For. Urban Green.* 29, 40–48. doi : 10.1016/j.ufug.2017.10.019
- n+p 2021. Canopée dans l'espace bâti et température au sol dans les communes vaudoises. Notice technique. Plan d'action biodiversité 2019-2030. Etat de Vaud. 4 p.
- OFEV 2017. Biodiversité en Suisse. Etat et évolution. Office fédéral de l'Environnement. État de l'environnement Nr. 1630: 60 p.
- OFEV 2018. Quand la ville surchauffe. Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement, No 1812 : 109 p.
- OFEV 2019. Cadre de référence Biodiversité et qualité paysagère dans les agglomérations. BAFU-410.1-1/2/1/2/22/28/40. 36 p.
- OFEV/ARE (éd.) 2022. Eau de pluie dans l'espace urbain. Fortes précipitations et gestion des eaux pluviales dans le contexte d'un développement urbain adapté aux changements climatiques. Office fédéral de l'environnement (OFEV) ; Office fédéral du développement territorial (ARE). Connaissance de l'environnement n° 2201 : 117 p.
- OFEV 2023: Biodiversité en Suisse. Etat et évolution. Office fédéral de l'Environnement. État de l'environnement Nr. 2306: 95 p.

- Obrist M.K., Sattler T., Home R., Gloor S., Bontadina F., Nobis M., Braaker S., Duelli P., Bauer N., Della Bruna P., Hunziker M., Moretti M., 2012. Biodiversität in der Stadt - für Mensch und Natur. Merkblatt für die Praxis, 48. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 12 Seiten.
- OFS 2022. Évolution de l'utilisation du sol.
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/espace-environnement/utilisation-couverture-sol/evolution.html>.
- Olszewska-Guizzo A., Sia A., Fogel A. et al. 2022. Features of urban green spaces associated with positive emotions, mindfulness and relaxation. *Sci Rep* 12, 20695. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24637-0>.
- O'Sullivan O.S., Holt A.R., Warren P.H., Evans, K. L. 2017. Optimising UK urban road verge contributions to biodiversity and ecosystem services with cost-effective management. *Journal of Environmental Management*, 191, 162-171.
- Pataki D.E., Emmi P.C., Forster C., Mills J., Pardyjak E.R., Peterson T. R., et al. 2009. An integrated approach to improving fossil fuel emissions scenarios with urban ecosystems studies. *Ecol. Comp.* 6, 1–14.
- Pataki D.E., Alberti M., Cadenasso M.L., Felson A.J., McDonnell M.J., Pincetl S., Pouyat, R.V., Setälä H., Whitlow T.H. 2021. The Benefits and Limits of Urban Tree Planting for Environmental and Human Health. *Front. Ecol. Evol.* 9:603757. doi: 10.3389/fevo.2021.603757
- 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.
- Prevedello J.A., Almeida-Gomes M., Lindenmayer D.B. 2017. The importance of scattered trees for biodiversity conservation: a global meta-analysis. *Journal of Applied Ecology* 55: 205-214.
- Price B., Gomez A., Mathys L., et al., 2017. Tree biomass in the Swiss landscape: nationwide modelling for improved accounting for forest and non-forest trees. *Environmental Monitoring and Assessment* 189: 106.
- Pyšek, P. 1993. Factors affecting the diversity of flora and vegetation in central European settlements. *Vegetatio*, 106: 89–100.
- Ragettli M., Flückiger B., Rösli M. 2017. Auswirkungen der Umwelt auf die Gesundheit. *Swiss TPH*. pp 86.
- Reichholf J.H. 2015. Hauptstadt der Nachtigallen – Warum die Vögel so sehr auf (Gross-)Städte fliegen. *Berl. Ornithol. Ber.* 25, 9-17.
- Reichert, A., Holz-Rau, C., Scheiner, J. 2016. GHG emissions in daily travel and long-distance travel in Germany – Social and spatial correlates. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 25–43. doi:10.1016/j.trd.2016.08.029
- Roloff A., Korn S., Gillner, S., 2009. The climate-species-matrix to select tree species for urban habitats considering climate change. *Urban Forestry & Urban Greening* 8:295-308.
- Roloff A. (Ed.). 2013. *Bäume in der Stadt*: Ulmer.
- Roloff A., Gillner S. 2013. Klimawandel und Stadtbaumarten. In Andreas Roloff (Ed.): *Bäume in der Stadt*: Ulmer, pp. 168–179.
- Roloff A., Gillner S., Vogt J., Hofman M. 2015: *Citree*. Edited by TU Dresden, Professur für Forstbotanik. Tharandt. Available online at <https://citree.de/>.
- Salmond J.A., Tadaki M., Vardoulakis S. et al. 2016. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environ Health* 15 (Suppl 1), S36. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>

- Saluz A., Zürcher N., Bernasconi A., Gubsch M., Eggenberger T. 2021. i-Tree — Bäume und Stadtwälder klimaangepasst managen, Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel, Bundesamt für Umwelt. 174 Seiten.
- Sattler T., Obrist M.K., Duelli, P., Moretti, M. 2011. Urban arthropod communities: Added value or just a blend of surrounding biodiversity? *Landscape Urban Planning*. 103: 347–361.
- Schwaab J., Meier R., Mussetti G., Seneviratne S., Bürgi C., Davin, E.L. 2021. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature communications*, 12: 1-11.
- Schweizerischer Verband Kommunale Infrastruktur et al. 2018. Stadtnatur im Dichtestress. Ergebnisse der Tagung vom 16. Mai 2018 in Solothurn. 4 p.
- Schlaepfer M.A., Guinaudeau B.P., Martin P. et al. 2020. Quantifying the contributions of native and non-native trees to a city's biodiversity and ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening* 56, 126861.
- Schlaepfer M.A., Guinaudeau B. P., Robert O. & Amos E. 2018. Projet NOS-ARBRES — Synthèse pour les instances de décision. 43 p.
- Sjöman H., Morgenroth J., Sjöman J.D., Sæbøed A., Kowariki I. I. 2016. Diversification of the urban forest—Can we afford to exclude exotic tree species? *Urban Forestry & Urban Greening* 18: 237-241.
- Somme L., Moquet L., Quinet M., Vanderplanck M., Michez D., Lognay G., Jaquemart A.L. 2016. Food in a row: urban trees offer valuable floral resources to pollinating insects. *Urban Ecosystems* 19: 1149-1161.
- Strohbach M.W., Arnold E., Haase D. 2012. The carbon footprint of urban green space – A life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*. 104(2). 220-229.
- Tervooren S. 2015. Potenziale von Grünvolumen und Entsiegelung zur Klimaanpassung am Beispiel der Landeshauptstadt Potsdam. *AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik*, S. 258–367. <http://tinyurl.com/y9h6vdc7>
- Threlfall C.G., Mata L., Mackie J.A., Hahs A. K., Stork N.E., Williams N.S.G., Livesley S.J. 2017. Increasing biodiversity in urban green spaces through simple vegetation interventions. *Journal of Applied Ecology*, 54(6), 1874–1883.
- Turrini, T. & Knop, E. 2015. A landscape ecology approach identifies important drivers of urban biodiversity. *Global Change Biology*, 21 (4), 1652 – 1667. doi:10.1111/gcb.12825.
- UrbaLyon 2019. Une Canopée pour la Métropole de Lyon? Enseignements d'un benchmark international. Grand Lyon. 24 p.
- Velasco E., Roth M., Norford L., Molina L.T. 2016. Does urban vegetation enhance carbon sequestration? *Landscape and Urban Planning*, 148, 99-107. /doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.003.
- Wood E.M., Esaian S. 2020. The importance of street trees to urban avifauna. *Ecological Applications*, (), eap.2149–. doi:10.1002/eap.2149
- Ziter C.D., Pedersen E.J., Kucharik C.J., Turner M.G. 2019. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *PNAS* 116: 7575-7580.