RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

EVALUATION

AVEC : ADAPTATION DU VEGETAL AU CLIMAT DE DEMAIN

Méthode pour des indicateurs liés au changement climatique

RAPPORT FINAL

Juin 2025

EXPERTISES

Plante&Cité
Ingénierie de la nature en ville

En partenariat avec l'ADEME et le Cerema,
et avec le soutien financier de Signature Biodiversité

ADEME AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
Cerema
Signature Biodiversité
Une marque d'engagement

AUTEURS

- Cédric LEMAIRE, Chargé d'étude au sein de Plante & Cité dédié au projet AVEC, docteur en écophysiologie végétale.
- Pauline LAÏLLE, Responsable de la coordination scientifique au sein de Plante & Cité
- Benjamin PIERRACHE, chargé d'étude Floriscope, Plante & Cité
- Maxime DÉPINOY, chargé de mission 'Écologie & Biodiversité', Plante & Cité
- Caroline GUTLEBEN, directrice de Plante & Cité

REMERCIEMENTS

Membres du Comité Technique du projet :
François BOISLEUX (ADEME)
Ariane ROZO (ADEME)
Tarik YAÏCHE (Cerema)
Jérôme CHAMPRES (Cerema)
Luc CHRÉTIEN (Cerema)
Cédric LEMAIRE (Plante & Cité)
Pauline LAÏLLE (Plante & Cité)
Benjamin PIERRACHE (Plante & Cité)
Maxime DÉPINOY (Plante & Cité)
Caroline GUTLEBEN (Plante & Cité)

Membres de la Cellule Scientifique du projet :
Thierry AMÉGLIO , INRAE, UMR PIAF : Physique et physiologie intégrative de l'arbre en environnement fluctuant
Claire ATGER, Docteure en arboriculture, spécialiste du système racinaire
Pierre-Emmanuel BOURNET, Institut Agro, EPHor : Environnement physique de la plante horticole
Yves CARAGLIO, CIRAD, UMR AMAP : Architecture et modélisation des plantes
Guillaume DECOCQ, CNRS, Université de Picardie Jules Verne, UMR EDYSAN : Ecologie et dynamique des systèmes anthropisés
Sabine DEMOTES-MAINARD, INRAE, UMR IRHS : Institut de Recherche en Horticulture et Semences
Marie-Reine FLEISCH, AgroParisTech, Université de Lorraine, INRAE, UMR SILVA
Gilles GALOPIN (INRAE, UMR IRHS : Institut de Recherche en Horticulture et Semences
Gildas GATEBLÉ, Directeur - Unité expérimentale Villa Thuret
Stéphane HERBETTE, INRAE, UMR PIAF : Physique et physiologie intégrative de l'arbre en environnement fluctuant,
Sophie HERPIN, Institut Agro, EPHor : Environnement physique de la plante horticole
Serge MULLER, Prof. émérite MNHN
Pierre PARPAY, Doctorant Institut Agro, INRAE, UMR IRHS : Institut de Recherche en Horticulture et Semences
Eléonore OBERLÉ, chargée de mission UEVT Villa Thuret
Marc SAUDREAU, INRAE, UMR PIAF : Physique et physiologie intégrative de l'arbre en environnement fluctuant
Lucas SCHREPFER, ADEME SAFA : Service Agriculture, Forêt et Alimentation

Membres du Groupe Miroir :

Christelle ANGÉNIOL, Ville de Paris
Augustin BONNARDOT, CAUE 77
Jac BOUTAUD, Resp. Arboretum La Petite Loiterie
Véronique BRUN, Verdir
Laurent CHADIRAC, Ville de Paris
Antoine DAGANAUD, Pépinières charentaises
Guillaume DEBORD, Ville de Paris
Franck GAILLET, FFP Normandie
Michel LE BORGNE, Pépinières Drappier
Guénolé LE MOALIGOU, FFP, Paysagiste-concepteur
Paulin LE ROUX, Signature biodiversité
Sandra MALAVAL, CBN Midi-Pyrénées
Jean-Charles MIGUEL, Soins Modernes Des Arbres (SMDA)
Jean-Marie MOLLET, Département des Bouches-du-Rhône
Sophie PELLIER, EPT Boucle Nord de Seine
Jean-Louis PETITPIED, Soins Modernes Des Arbres (SMDA)
Damien PROVENDIER, CBN Midi-Pyrénées
Frédéric SEGUR, AVP - Arbre, Ville et Paysage

CITATION DE CE RAPPORT

LEMAIRE Cédric, LAÏLLE Pauline, PIERRACHE Benjamin, DÉPINOY Maxime, GUTLEBEN Caroline. 2025. AVEC, Adaptation du Végétal au Climat de demain, Rapport final. 39 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne https://librairie.ademe.fr/

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME
ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : N°2317D0011

Étude réalisée par Plante & Cité en partenariat avec le CEREMA pour ce projet cofinancé par l'ADEME, le CEREMA et l'Interprofession VALHOR

Projet de recherche coordonné par : Plante & Cité

Coordination technique - ADEME : ROZO Ariane
Direction/Service : Direction Adaptation Aménagement et Trajectoires bas carbone
Pôle Aménagement des Villes et des Territoires (PAVT)

SOMMAIRE

RÉSUMÉ 7

ABSTRACT 8

1. LE PROJET AVEC ET SES OBJECTIFS 9

1.1. Enjeux et contexte général 9
1.2. Les objectifs du projet AVEC 9
1.3. Les objectifs opérationnels du projet AVEC 10
1.4. Finalités et valorisation des résultats du projet AVEC 10

2. MATERIELS ET METHODES 10

2.1. Environnement scientifique et technique : la comitologie du projet AVEC 10
2.2. Quelles essences étudier ? Le périmètre taxonomique d'AVEC 11
2.3. Quels facteurs environnementaux cibler ? Le périmètre thématique d'AVEC 12
2.3.1. Résistance aux conditions chaudes et sèches 13
2.3.2. Potentiel de rafraîchissement 14
2.3.3. Potentiel de séquestration carbone 15

2.4. Identifier et extraire les données source 16
2.4.1. Sources principales et assemblages 16
2.4.2. Les données TreeGOER 17
2.4.3. Les données TRY 17
2.4.4. Les données de vulnérabilité à l'embolie 18
2.4.5. Les données de point de perte de turgescence 19
2.4.6. Les données de densité du bois et de surfaces foliaires spécifiques 20
2.4.7. Les données liées à la dimension des plantes à maturité 20

2.5. Construction des indicateurs 20
2.5.1. Potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches 21
2.5.2. Indice de confiance 22
2.5.3. Potentiel de rafraîchissement 23
2.5.4. Potentiel de séquestration carbone 25

3. BILAN : PRODUCTION DE CRITERES ET D'INDICATEURS 26

3.1. Périmètre taxonomique 26
3.2. De nouveaux critères et indicateurs 27
3.3. Nombre d'essences renseignées 29

4. ACCES AUX DONNEES ET INDICATEURS 30

4.1. De nouveaux contenus dans Floriscope.io accessibles à tous 30
4.2. De nouvelles données dans Végébase, accessibles aux porteurs d'outils 31

5. PERSPECTIVES POUR ACQUERIR DE NOUVELLES DONNEES 34

5.1. Voies d'acquisition potentielles 34
5.2. Pistes partenariales 35
5.2.1. Réseaux d'observations de plantations urbaines pour les données de longévité 35
5.2.2. Acquisition de données de modélisation pour les niches bioclimatiques 35
5.2.3. Évaluation du niveau de confiance de l'indicateur par dires d'experts 35
5.2.4. Acquisition de données par des mesures expérimentales au laboratoire 36

6. CONCLUSION 36

6.1. Bilan des actions de communication 36
6.2. Bilan des actions de diffusion des connaissances 37

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 38

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES 44

SIGLES ET ACRONYMES 46

RÉSUMÉ

En milieu urbain, **le choix des essences** constitue l'une des stratégies d'adaptation au changement climatique pour permettre (i) le maintien et la régénération des végétaux, notamment des strates arbustive et arborée, et (ii) l'optimisation des services rendus, notamment de régulation du climat (ombrage, rafraîchissement).

Le projet AVEC (Adaptation du VEgétal au Climat de demain) vise à étudier, pour des espèces d'arbres, arbustes et plantes grimpantes, les caractéristiques impliquées dans les mécanismes biologiques et physiologiques pour **la résistance aux conditions chaudes et sèches**, en relation avec les projections climatiques pour l'aire métropolitaine française, et pour **leur capacité de rafraîchissement**. Dans une moindre mesure, le projet explore les capacités de séquestration de carbone des mêmes taxons.

Ce projet de 22 mois s'est appuyé sur une approche théorique en botanique et en physiologie végétale, fondée sur un travail bibliographique, pour **construire des indicateurs** en collectant et en exploitant les données scientifiques existantes sur les processus physiologiques ciblés. Les recherches ont été suivies par **une cellule scientifique** constituée d'une quinzaine de chercheurs issus de divers centres de recherches et **un groupe miroir** composé de professionnels du végétal dont les spécialités et approches alimentent le projet.

La liste des taxons à caractériser prioritairement inclut les végétaux les plus couramment produits et plantés en France métropolitaine ainsi que des plantes issues des zones biogéographiques méditerranéennes. Au total ce sont environ 2 100 taxons correspondant à 1 300 espèces différentes qui constituent le périmètre taxonomique de l'étude AVEC.

Cette étude a permis de faire un état des lieux des données disponibles pour le périmètre taxonomique visé. Les connaissances actuelles sur la vulnérabilité des ligneux aux facteurs de stress existants restent rares et ne sont disponibles que pour un nombre limité d'espèces et de facteurs de stress spécifiques. Certaines catégories de végétaux, telles que les végétaux horticoles, les arbustes ou les plantes grimpantes, sont peu étudiées et l'on dispose de peu de données les concernant. Un potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches a cependant pu être établi pour **786 taxons**. Un potentiel d'ombrage a été calculé sur 908 taxons et la transpiration estivale a pu être évaluée sur 160 taxons.

Le projet AVEC a notamment pour finalité d'enrichir la base de données **Végébase** de Plante & Cité. Les connaissances produites (critères et indicateurs) sont consultables

ABSTRACT

In the urban environment, **the choice of plant species** is one of the strategies for adapting to climate change, to enable (i) the maintenance and regeneration of plants, particularly in the shrub and tree strata, and (ii) the optimization of the services provided, particularly in terms of climate regulation (shading, cooling).

The AVEC project (*Adaptation du VEgétal au Climat de demain*) aims to study, for species of trees, shrubs and climbers, the characteristics involved in biological and physiological mechanisms for **resistance to hot and dry conditions**, in relation to climate projections for the French metropolitan area, and for their **cooling capacity**. To a lesser extent, the project explores the carbon sequestration capacities of the same taxa.

This 22-month project drew on a theoretical approach in botany and plant physiology, based on bibliographical work, to **build indicators** by collecting and exploiting existing scientific data on targeted physiological processes. The research was supervised by a **scientific team** made up of fifteen experts from diverse French research centers and a "**mirror group"** of plant professionals whose expertise fed into the project.

The list of taxa prioritized for characterization includes the plants most produced and planted in mainland France, as well as plants from Mediterranean biogeographical zones. In all, some 2,100 taxa corresponding to 1,300 different species make up the taxonomic perimeter of the AVEC study.

This study enabled us to take stock of the data available for this taxonomic perimeter. Current knowledge of the vulnerability of woody plants to existing stress factors remains scarce and is only available for a limited number of species and specific stress factors. Some plant categories, such as horticultural plants, shrubs and climbers, are poorly studied, and little data is available on them. However, a climatic resistance potential in hot, dry conditions has been established for **786 taxa**. Shade potential was calculated for 908 taxa, and summer transpiration was assessed for 160 taxa.

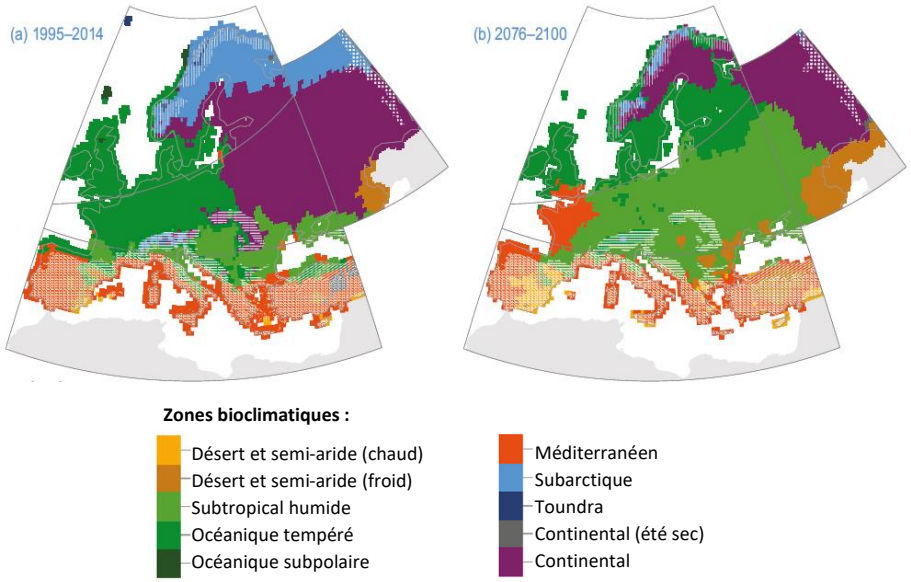
One of the aims of the AVEC project is to enrich Plante & Cité's **Végébase** database. The knowledge produced (criteria and indicators) can be consulted without restriction from the **Floriscope.io** application. The data will also be used to feed decision-making tools such as Sésame, developed by Cerema, a partner in the project.

1. Le projet AVEC et ses objectifs

1.1. Enjeux et contexte général

Les végétaux fournissent de nombreux services aux habitants des centres urbains, comme la régulation des cycles géochimiques (eau, air, carbone…) et du climat (notamment rafraîchissement) à différentes échelles, ou la valeur culturelle et esthétique, modulant en cela la santé mentale et physique des personnes. Le maintien et l'augmentation de la place des végétaux en milieu urbain constitue une piste d'adaptation face notamment à l'élévation des températures.

En ville, les plantes sont soumises à un environnement contraint et stressant qui limite leur durée de vie, en comparaison avec les espèces évoluant en milieu forestier ou naturel (qui répondent par ailleurs à d'autres usages et attentes). Par ailleurs, leur développement peut se heurter aux usages anthropiques des espaces qu'elles occupent. L'évolution du climat fait peser une menace supplémentaire sur la survie des plantes en ville, avec une augmentation en fréquence et en intensité des phénomènes climatiques extrêmes susceptibles d'aboutir à la mortalité des individus. Cela questionne la possibilité de maintien



(résistance et résilience) des arbres, arbustes et grimpantes, ainsi que la capacité de ces végétaux à continuer à assurer les services écosystémiques sous un climat futur.

Figure 1 : Évolutions des zones climatiques en Europe entre les périodes 1995-2014 et 2076-2100. Les motifs blancs correspondent aux hotspots de biodiversité. GIEC (2022) d'après Rubel & Kottek (2010).

Le maintien de la végétation urbaine et la diversification de la palette végétale employée constitue des questionnements récurrents face aux souhaits de territoires plus résilients. Pour y répondre, il s'avère nécessaire de mieux connaître la capacité d'adaptation des différentes espèces face aux phénomènes climatiques qui risquent de les affecter le plus, ainsi que leur capacité à maintenir leur fonctionnement (et les services qui en découlent) dans un environnement plus stressant.

1.2. Les objectifs du projet AVEC

Le projet AVEC vise à répondre au besoin de connaissances fiables et sourcées concernant la réponse des végétaux sous un climat futur en France métropolitaine, pour les taxons d'arbres, arbustes et plantes grimpantes déjà présents en ville, produits par les pépinières françaises, ou d'intérêt pour les professionnels de la nature en ville.

Pour chaque taxon, il s'agit donc d'identifier et de rassembler les données disponibles, portant sur les caractéristiques impliquées dans les mécanismes biologiques et physiologiques d'adaptation et de résistance aux conditions climatiques, ainsi que dans le potentiel de rafraîchissement.

Ce projet opte pour une approche théorique en botanique et en physiologie végétale, fondée sur un travail bibliographique. Il ne prétend pas produire de nouvelles données mais vise à construire des indicateurs en collectant et exploitant les données déjà existantes sur les processus physiologiques impliqués dans la résistance des plantes aux stress climatiques.

1.3. Les objectifs opérationnels du projet AVEC

Le projet s'est construit autour de 5 objectifs représentant une suite d'étapes de travail :

- **Objectif #1 :** Préciser le périmètre taxonomique investigué.
- **Objectif #2a :** Identifier les critères d'intérêt sur la résistance, l'adaptation au changement climatique et la capacité de rafraîchissement d'une large diversité d'essences.
- **Objectif #2b :** Identifier les sources et collecter des données scientifiques correspondantes.
- **Objectif #3 :** Concevoir des méthodes pour produire des critères et alimenter le système d'information Végébase.
- **Objectif #4 :** Concevoir des méthodes pour la production d'indicateurs, exploitables dans Sésame et d'autres outils d'aide à la décision.
- **Objectif #5 :** Proposer des démarches pour produire les données recherchées si AVEC démontre qu'elles n'existent pas encore, et initier une première vague d'acquisition.

1.4. Finalités et valorisation des résultats du projet AVEC

Le projet AVEC a pour finalité d'enrichir la base de données Végébase de Plante & Cité à l'aide d'indicateurs portant sur la résistance climatique des taxons ainsi que leur capacité à maintenir leur potentiel de rafraichissement, dans un contexte de climat futur projeté pour la France métropolitaine.

Les connaissances produites sont consultables depuis l'application web et mobile Floriscope de Plante & Cité (www.floriscope.io). Les indicateurs pourront aussi alimenter des outils d'aide à la décision, comme Sésame, développé par le Cerema, partenaire du projet. Des pistes de réflexions permettront d'aborder le potentiel des taxons à participer à l'atténuation des changements climatiques, par leur capacité de séquestration du carbone.

2. Matériels et méthodes

2.1. Environnement scientifique et technique : la comitologie du projet AVEC

Les avancées des réflexions et directions prises pour orienter les recherches ont fait l'objet de présentations régulières aux comités qui accompagnent le projet AVEC. Les participants à ces comités ainsi que leurs organismes de rattachement sont listés en section « remerciements » en pages 2 et 3 de ce rapport.

- **Le comité technique** est composé de l'équipe projet de Plante & Cité et de représentant·es de l'ADEME et du Cerema, partenaires et cofinanceurs du projet.
- **La cellule scientifique** est constituée d'une quinzaine de chercheur·es issu·es de divers centres de recherches (Universités, INRAE, CNRS, Institut Agro) et dont les spécialités couvrent l'ensemble des questions abordées par le projet. En plus de plénières en visioconférence,

chaque membre a été sollicité pour un entretien individuel avec Cédric Lemaire (d'une durée d'environ une heure) pour donner son avis sur le projet et l'avancement du travail, au regard de ses propres recherches. Au cours du projet, la cellule scientifique a été réunie à trois reprises, le 21 septembre 2023, le 15 janvier 2024, et le 15 novembre 2024.

- **Le groupe miroir** regroupe une trentaine de professionnels en lien avec la question du végétal en milieu urbain : pépiniéristes, paysagistes concepteurs, collectivités, bureaux d'études, experts, interprofession VALHOR. Il a été formé dans l'optique de mesurer les bénéfices du projet pour les professionnels. Le groupe miroir s'est réuni deux fois : le 11 avril 2024 pour partager le cadre du projet et la méthode de construction de la liste taxonomique, et le 19 décembre 2024 pour présenter la méthode de production des indicateurs.

2.2. Quelles essences étudier ? Le périmètre taxonomique d'AVEC

La construction du périmètre taxonomique a fait l'objet d'un travail de compilation de différentes listes :

- Outil SESAME du Cerema,
- Projet ARDEM – arbres de demain en Méditerranée – de l'unité expérimentale Villa Thuret, INRAE,
- Catalogues des taxons cultivés en France d'après Floriscope,
- Essences travaillées par l'ONF dans son projet Îlots d'avenir,
- Listes d'essences issues des plans arbres de collectivités territoriales,
- Auxquelles ont été ajoutées des listes d'arbustes et de grimpantes courantes pour l'aménagement urbain en France.

Après nettoyage et dédoublonnage, la liste comportait 4 600 taxons. Afin de restreindre le périmètre taxonomique à environ 2 000 taxons (volume compatible avec la capacité de travail au sein du projet), un système de pondération a été mis en place en tenant compte de plusieurs facteurs :

- Contribution au projet SESAME,
- Appartenance du réservoir des végétaux indigènes cultivables,
- Fréquence des végétaux actuellement présents dans les villes et pépinières,
- Prise en compte des arbustes et des grimpantes ligneuses par rapport aux arbres,
- Présence de végétaux jugés a priori prometteurs au sein de la comitologie (cellule scientifique, groupe miroir).

Ce travail de pondération a permis de faire ressortir en priorité les taxons présents sur des listes « incontournables » et des taxons présents sur plusieurs listes.

Titre	Source	Pondération (note entre 1 et 5)	Nombre de taxons retenus
Compilation des listes des différentes versions de l'outil SESAME	Cerema	5	408
Arbres de Demain en Méditerranée	INRAE – Villa Thuret et Collectif ARDEM	5	48
Ligneux indigènes sur territoire national	Floriscope	5	152
Liste ONF	ONF – Arbre Conseil	3	45
Liste essences préconisées ville de Rennes	Ville de Rennes	3	137

Commenté [BP1]: Ajouter quelques lignes pour rappeler que l'étude ne considère pas les variations infra-taxonomiques (écotypes, populations, clones, historique individuel des individus dont conditions culturales et mode de x°)

Guide essences ville de Paris (plan arbre)	Ville de Paris	3	129
Taxons inclus dans les Barème de l'arbre	Plante & Cité	1,5	1058
Classement des arbustes les plus fréquents dans 90 pépinières françaises	Floriscope	4	765
Espèces de grimpantes fréquentes dans 90 pépinières françaises	Floriscope	4	93
Worldwide Climate Change	Esperon-Rodriguez et al., 2022	1	1536
Livre blanc de la Société Botanique de France	Société Botanique de France	3	62
Sélection d'O. Filippi (pépiniériste spécialiste des « jardins secs »)	Pépinières Filippi	3	34
Innoplante (plantes innovantes à potentiel pour l'horticulture)	Astredhor	3	18
Drought tolerant trees	Sjöman & Anderson, 2023	3	75

Tableau 1 : Récapitulatif des sources constitutives du périmètre taxonomique

Le périmètre taxonomique a été présenté à des professionnels de la filière et à des collectivités lors d'une réunion du groupe miroir, début avril 2024. Leurs retours ont permis de valider à la fois les types de végétaux étudiés, leurs proportions (arbres/arbustes/grimpantes/autres ou indigènes/exotiques/horticoles), et de vérifier qu'il n'y manquait pas de taxons essentiels ou à fort potentiel pour la filière. Les retours ont permis d'ajouter une dizaine de taxons supplémentaires. La version finale du périmètre taxonomique comprend donc 1 300 espèces pour un total de 2 100 taxons (incluant sous-espèces, variétés, formes, cultivars et groupes de cultivars).

Par la méthode de travail du projet AVEC, il n'a pas été possible de tenir compte des potentielles variations infra-taxonomiques (écotypes, populations, clones, historique individuel des individus tel que conditions culturales ou mode de multiplication).

2.3. Quels facteurs environnementaux cibler ? Le périmètre thématique d'AVEC

Le travail bibliographique initial a permis de préciser dans quelle mesure le changement climatique peut affecter les espèces végétales, c'est-à-dire les facteurs environnementaux qui sont à l'origine de la mortalité des végétaux actuellement et qui s'intensifieront sous l'action des changements climatiques.

Des arbitrages ont dû être faits pour permettre la production d'une étude qui soit aboutie et proportionnée aux contraintes matérielles du projet AVEC. Aussi, nous avons choisi de nous centrer sur

les phénomènes climatiques dont il ressort de l'étude bibliographique qu'ils provoquent une mortalité massive chez les espèces végétales, qui verront vraisemblablement leur intensité ou leur fréquence augmenter selon les projections climatiques actuelles, et face auxquels les traits biologiques concernés sont décrits dans de grandes bases de données scientifiques, quantitatives et accessibles.

- Ainsi, le travail sur la résistance climatique se concentre sur la vulnérabilité des taxons face au manque d'eau et à de hautes températures. On parle de **résistance climatique en conditions chaudes et sèches**. Afin d'accroître la robustesse du travail, deux approches ont été croisées, à savoir : la modélisation des niches climatiques des taxons et la compilation de traits physiologiques reflétant la résistance des taxons dans ces conditions.
- La notion de **potentiel de rafraichissement** a également fait l'objet d'une étude bibliographique. Ce service écosystémique est largement décrit dans la littérature, les traits morphologiques et physiologiques associés au potentiel de rafraichissement sont connus. Ces traits font l'objet d'un consensus dans la littérature, aussi, ce volet n'a pas nécessité d'arbitrages aussi importants que pour la notion de résistance climatique.
- Enfin, la notion de **séquestration carbone** reste à traiter dans le but de fournir un état de l'art et une réflexion circonstanciée concernant cette thématique.

Le groupe miroir a considéré, à juste titre, que la résistance climatique ne passait pas uniquement par la capacité des taxons à faire face à des conditions chaudes et sèches, mais aussi à leur capacité à **tolérer la submersion temporaire** – phénomène particulièrement présent en France pendant le projet (hiver 2024/2025 précisément). Nous avons donc mené un travail préliminaire sous la forme d'une revue de littérature horticole (catalogue, ouvrages de référence) pour identifier les données disponibles à ce sujet. Les quelques (rares) sources identifiées ont ainsi permis de dresser une liste thématique des essences tolérant des submersions de durée moyenne à courte. Les essences pour lesquelles des contradictions entre sources existaient ont été écartées. Cette liste, disponible sur Floriscope (https://www.floriscope.io/listes/14419/180-arbres-tolerant-les-inondations-temporaires), pourra être amendée ou corrigée par dires d'experts ou par la découverte de sources complémentaires.

2.3.1. Résistance aux conditions chaudes et sèches

2.3.1.1. Approche par les niches climatiques

Par une approche statistique croisant les données géolocalisées d'occurrence pour un taxon donné et les données climatiques des aires géographiques concernées, il est possible de calculer la niche climatique qu'occupe ce taxon. Si nous considérons que ses besoins climatiques resteront constants dans le temps, il est possible d'utiliser les projections climatiques pour estimer quel espace géographique sera compatible avec la niche climatique de ce taxon à l'avenir.

Pour mobiliser ce concept de niches climatiques dans le projet AVEC, deux scénarios ont été étudiés.

- D'une part, la création de ces niches à partir de données brutes (données géolocalisées d'occurrence et données climatiques).
- D'autre part, l'utilisation de niches existantes, construites par d'autres équipes de recherche et déjà publiées dans la littérature scientifique.

La première option a été discutée avec des équipes de recherche spécialistes de ces questions et les membres de la cellule scientifique du projet AVEC (en particulier, G. DECOCQ et N. LENOIR, UMR EDYSAN, Écologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés, CNRS et Université de Picardie Jules Verne). Il est apparu qu'une telle démarche, pour être menée à l'échelle du périmètre taxonomique du projet AVEC, nécessiterait des moyens supérieurs à ceux du projet. À titre d'illustration, la construction des niches climatiques pour une centaine d'espèces aurait nécessité 1 ETP pendant 4 à 6 mois.

En parallèle, la revue de littérature a permis de mettre en avant l'existence d'une base de données étoffée associant des données climatiques et les données du GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*, la base

de données de référence pour la géolocalisation des espèces vivantes) pour 48 000 espèces d'arbres. Ainsi, compte-tenu de la qualité et de l'accessibilité de ces données-là, la décision a été prise d'utiliser ces dernières, compilées et publiées sous le nom **TreeGOER (*Globally Observed Environmental Range*)** par Kindt *et al*. (2023).

Étant donné que cette base de données se focalise principalement sur les arbres, un effort de recensement de sources resterait à faire pour identifier des données de niches climatiques pour des espèces d'arbustes et de plantes grimpantes identifiés comme « incontournables » selon la pondération de notre périmètre taxonomique.

2.3.1.2. Approche par les traits physiologiques d'intérêt

Une première revue de littérature a permis d'identifier les traits physiologiques d'intérêt répondant à la notion de « résistance climatique » telle que définie dans le projet AVEC. Ces traits sont impliqués dans la dynamique de réponse de la plante en situation de sécheresse (la réponse au stress thermique n'étant pas suffisamment renseignée dans les sources investiguées). En particulier, **la fermeture des stomates**, qui détermine l'intensité de stress hydrique à partir de laquelle un taxon va réduire ses pertes en eau, et **la vulnérabilité à l'embolie**, qui renseigne sur le seuil de mortalité par défaillance hydraulique.

Plusieurs bases de données ont été identifiées pour les traits d'intérêt.

- La base de données **TRY – *Plant Trait Database*** (Kattge et al., 2020) est une base de données de traits fonctionnels des plantes, constituée par le regroupement de plusieurs bases de données et de dépôts faits par des chercheurs depuis une décennie : elle constitue une part importante des données physiologiques mobilisées dans AVEC.
- Pour compléter cette base de données, un travail de recensement a été amorcé afin d'identifier des bases de données ou méta-analyses qui ne sont pas inclues dans TRY, par exemple : Sjöman et al. (2018), Tordoni et al. (2022) et Wang et al. (2022) pour le potentiel de perte de turgescence, *The Xylem Functional Traits Database* (en cours de construction) pour la vulnérabilité à l'embolie.

Un certain nombre de taxons ne sont pas être renseignés dans ces sources car sont absents des bases de données de traits physiologiques connues. Pour ces taxons, il est possible d'utiliser d'autres traits décrits dans la littérature et corrélés avec les traits physiologiques qui nous intéressent. En particulier, la densité du bois est un trait anatomique disponible pour un grand nombre de taxons et dont la corrélation avec les traits physiologiques de vulnérabilité à l'embolie et de potentiel de fermeture stomatique est établie. Ce trait pourra être extrait aussi bien de la base de données TRY que de bases de données spécifiques, telle que *The Wood Database* (Meier, 2007) ou Chave et al. (2009), par exemple.

2.3.2. Potentiel de rafraîchissement

Pour aborder la question du potentiel de rafraîchissement du climat local, deux mécanismes indépendants peuvent être distingués.

- **L'ombrage** repose sur l'interception des rayonnements lumineux et réduit la température de surface des objets situés sous les végétaux (chaleur sensible). Cet effet est maximal sur des objets sombres, comme bitume (Rahman et al., 2020). En revanche, l'interception du rayonnement solaire par le végétal ne permet d'améliorer que marginalement le bilan radiatif de la ville (Smithers et al., 2021). L'effet d'ombrage dépend de la surface de canopée projetée au sol et de la densité du feuillage (Rahman et al., 2024).

- **L'évapotranspiration** repose sur l'échange d'énergie nécessaire au changement d'état de l'eau au niveau des feuilles (chaleur latente). Cela nécessite que les plantes soient en situation de confort hydrique pour maintenir leur transpiration (Smithers et al., 2021). L'énergie utilisée pour l'évaporation de l'eau réduit directement l'effet d'îlot de chaleur urbain. Dans le cas d'un arbre, cet effet est maximal à l'intérieur du houppier plante mais moins perceptible à hauteur humaine (Mballo et al.,

2021). La capacité de rafraichissement par évapotranspiration peut être évaluée par une combinaison de traits allométriques et physiologiques, tels que la surface foliaire ou le potentiel de fermeture stomatique (Rahman et al., 2024).

D'un point de vue énergétique, la réduction de chaleur due à la transpiration est trois fois plus importante que celle due à l'évaporation (Mballo et al., 2021). De plus, en situation de stress hydrique, la plante diminue fortement l'évapotranspiration par fermeture des stomates, mais cela n'affecte que modérément la capacité d'ombrage (Shashua-Bar et al., 2023 ; Thierry et al., 2024). Ainsi, pour le choix des taxons, il est important de tenir compte de leur résistance au déficit hydrique pour assurer le maintien de l'évapotranspiration (Thierry et al., 2024) ou de considérer préférentiellement la capacité d'ombrage en comparaison de l'évapotranspiration lorsque l'aire urbaine considérée est située en zone chaude et sèche avec des stress hydriques fréquents (Shashua-Bar et al., 2023).

Dans le cadre du projet AVEC, les données recherchées pour la caractérisation du service de régulation du climat local sont la **surface foliaire** et la **densité foliaire** des taxons. À défaut de données disponibles, des indications allométriques sur les **dimensions de la plante** sont utilisées comme proxy. Ces informations ont servi aussi bien à déterminer la surface d'interception des rayons lumineux (capacité d'ombrage) que la surface de transpiration (capacité d'évapotranspiration). La plante limite l'évapotranspiration lorsqu'elle n'est plus en situation de confort hydrique. Cela nécessite de renseigner le potentiel hydrique de **fermeture stomatique**. Des proxys ont été utilisés lorsque ces données n'étaient pas disponibles, comme la densité du bois ou la vulnérabilité à l'embolie (Litvak et al., 2012).

2.3.3. Potentiel de séquestration carbone

Dans le cadre du projet AVEC, l'étude du potentiel de séquestration carbone des taxons est identifiée comme un objectif secondaire face aux enjeux de résistance climatique et de rafraîchissement. À ce titre et compte-tenu des moyens disponibles pour le projet, il n'a pas été possible de mener une étude bibliographique approfondie à ce sujet. L'équipe projet a fait le choix, validé par le COTECH AVEC, de reprendre la méthodologie employée dans le Barème de l'arbre VIE/BED[1].

Ce barème d'évaluation de la valeur d'un arbre individuel comporte en effet un volet dédié aux caractéristiques intrinsèques du taxon évalué, parmi lesquelles la capacité de séquestration carbone. D'après la littérature scientifique, la quantité de carbone présente dans un arbre donné en un instant donné dépend en premier lieu du diamètre de son tronc et en second lieu de la densité de son bois, avant sa hauteur globale (Chave et al., 2009).

Rapportée à l'échelle d'un taxon et non d'un arbre individuel, la capacité de séquestration carbone définie dans la méthode VIE/BED dépend de la capacité du taxon à produire de la biomasse aérienne et souterraine, et est approximée à l'aide de trois paramètres.

- **La grandeur** du taxon correspond à ses dimensions potentielles à maturité. Ce paramètre est employé ici comme un proxy des maximas à la fois du diamètre du tronc et de la hauteur globale. Plus un taxon est grand, plus le volume de biomasse qu'il produit l'est également, contribuant à maximiser le potentiel de séquestration carbone. Pour le Barème de l'arbre VIE/BED, les valeurs utilisées sont les classes de grandeur définies et publiées par l'Institut pour le développement forestier (IDF) : *Planter aujourd'hui, bâtir demain : Le préverdissement* (Guinaudeau, 1987) et *L'arboriculture urbaine* (Maillet & Bourgery, 1993). Les données ont été complétées à partir de plusieurs ouvrages : *Guide illustré des érables* (Le Hardÿ de Beaulieu A., 2001) ; *Botanica, encyclopédie de botanique et d'horticulture* (Collectif, 1997) ; *Les chênes* (Camus, 1938) ; *Guide illustré des chênes* (Le Hardÿ de Beaulieu & Lamant, 2010) ; *Magnolia* (Langlois & Jancel, 2010) ; Enc*yclopédie universelle des 15 000 plantes et fleurs de jardin* (Brickell & Mouliane, 2004) ; *Larousse des arbres* (Brosse, 2000).

[1] Projet 2016-2020 mené par Plante & Cité et ses partenaires (Copalme, CAUE 77) grâce à des cofinancements VALHOR et SEQUOIA. Plus d'informations : https://www.plante-et-cite.fr/projet/fiche/100/

Dans le cadre de AVEC, cette donnée a pu être comparée au paramètre équivalent déjà présent dans Végébase-Floriscope (hauteur à maturité). Le taux de correspondance était important (env. 80 %) mais pas total. Le rapprochement de ces deux données a permis de les consolider mutuellement.

- **La longévité** du taxon renseigne sur la durée pendant laquelle le carbone séquestré est stocké dans la plante. Pour le Barème de l'arbre VIE/BED, les longévités d'un grand nombre de taxons ont été compilées à partir des mêmes sources que la grandeur, additionnées des ouvrages suivants : *Flore Forestière Française*, tomes 1, 2, 3 (Rameau, et al., 2003) ; *Les résineux* (Riou-Nivert, 2001).
- **La densité du bois** renseigne sur la quantité de carbone présente dans un volume de bois donné et est déterminante pour le calcul du carbone stocké par un arbre donné. Les densités moyennes du bois d'un grand nombre de taxons ont été reprises de Zanne et al. (2009) pour le Barème de l'arbre VIE/BED (*Global wood density database*).

  Dans le cadre de AVEC, cette donnée a pu être actualisée pour un certain nombre de taxons, à partir du travail de Díaz et al. (2022) fondé sur les données TRY.

2.4. Identifier et extraire les données source

2.4.1. Sources principales et assemblages

Assez tôt dans le projet, les bases de données **TreeGOER** (*Globally Observed Environmental Range*, Kindt et al., 2023) et **TRY** (*Plant Trait Database,* Kattge et al., 2020) ont été identifiées via les recherches bibliographiques. Elles ont été choisies comme sources principales pour le projet AVEC pour deux raisons :

- Leur qualité scientifique. Elles ont été publiées par un grand nombre d'auteurs dans des revues à comité de lecture, par ailleurs un grand nombre d'autres publications y font référence et elles sont régulièrement actualisées.
- Leur large couverture taxonomique. Elles renseignent un grand nombre de taxons à partir d'observations et de mesures réalisées dans le monde entier.

Nom	Accès	Nombre de taxons par critère visé (dont taxons du périmètre taxonomique AVEC)			
		Niche climatique	Traits physiologiques		
			Vulnérabilité à l'embolie	Perte de turgescence	Densité du bois
TreeGOER	https://zenodo.org/records/10008994	48 000 (740)			
TRY	https://www.try-db.org		920	285	12 800

Tableau 2 : Récapitulatif du contenu des deux principales bases de données mobilisées dans le projet AVEC

Ponctuellement, diverses publications et méta-analyses ont été mobilisées pour compléter les données TRY.

Une difficulté a résidé dans le fait d'établir des correspondances exactes, sans erreurs, entre ces bases de données et le périmètre taxonomique AVEC. En effet, la taxonomie est un domaine complexe et mouvant et les noms de plantes renseignés dans chaque source ne correspondent pas toujours. Ce point a été réglé grâce à différents outils : le **matcher Végébase** de Plante & Cité, le webservice ***Taxonomic Name Resolution Service* (TNRS)** et la vérification manuelle. Ils permettent de corriger des listes de noms de plantes et d'utiliser les dénominations officielles, en vigueur au moment du projet. Cette étape est essentielle, en vue d'assembler de manière fiable les données issues de différentes sources.

Tous les traitements de données réalisés dans AVEC ont été réalisés dans l'environnement R.

2.4.2. Les données TreeGOER

Pour construire la base de données TreeGOER, Kindt s'est basé sur :

- Des données d'occurrence issues de la base de données *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) et compilées pour les espèces d'arbres par Keppel et al. (2021), basé sur une liste taxonomique publiée précédemment (*GlobalTreeSearch*, Beech et al., 2017).
- Des données climatiques issues du modèle World Clim 2 (Fick & Hijmans, 2017).

Dans le cadre du projet AVEC, nous avons utilisé la Version 2024.07 et l'Expansion 2024 de TreeGOER.

Nous cherchons à renseigner la tolérance des taxons pour **les conditions chaudes et sèches**. Nous souhaitons identifier les extrêmes climatiques auxquels les plantes sont susceptibles d'être exposées et susceptibles de provoquer leur mortalité. Parmi les 51 variables climatiques disponibles dans TreeGOER, nous avons retenu les deux paramètres suivants :

- **BIO5** = *Max Temperature of Warmest Month*. C'est la moyenne des maxima journaliers du mois le plus chaud, sur la période 1970-2000, en degrés Celsius (°C).
- **BIO17** = *Precipitation of Driest Quarter*. C'est le cumul des précipitations du trimestre le plus sec, sur la période 1970-2000, en millimètres (mm).

Pour représenter les valeurs correspondant aux limites de tolérances pour ces deux variables et pour limiter l'effet des espèces qui ont une large aire de distribution, nous nous concentrons sur les quantiles 0,5 et 0,95 pour BIO5 et BIO17, représentant respectivement les limites de températures et de précipitations au-delà desquelles on ne trouve que 10 % des données d'occurrence.

Les données de TreeGOER ont été traitées selon la méthode donnée par Kindt (2023) et détaillée dans le supplément à sa publication : gcb16914-sup-0001-appendixs1_Scripts.pdf.

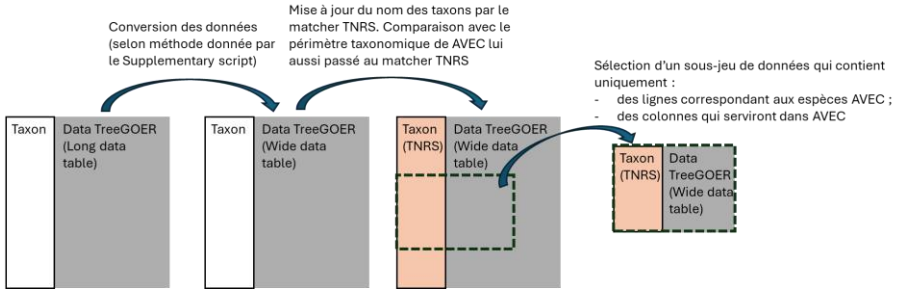


Figure 2 : Processus de traitement des données issues de TreeGOER.

2.4.3. Les données TRY

Les données TRY sont obtenues via deux requêtes soumises via le TRY Data Portal en 2024. Elles sont traitées dans R à l'aide du **package rtry** (Lam et al., 2024) et selon la méthode donnée dans la documentation du package.

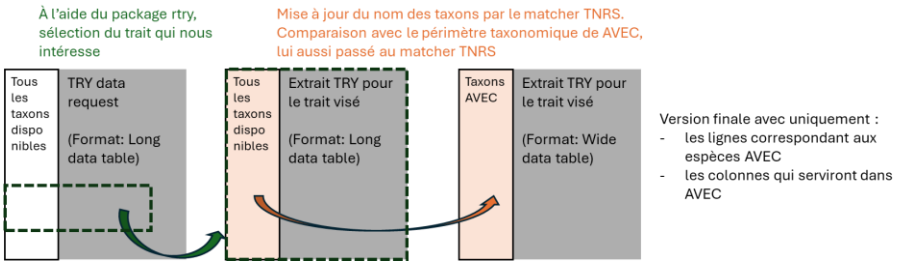


Figure 3 : Processus de traitement des données issues de TRY

2.4.4. Les données de vulnérabilité à l'embolie

Le P_{50} est la pression qui induit 50 % de perte de conductance dans les vaisseaux conducteurs de la plante, du fait de l'embolie. Ce paramètre a un sens fonctionnel : c'est le « seuil de non-retour », le point à partir duquel on observe de la mortalité, même en cas d'arrêt de la sécheresse et de ré-arrosage. Cela est surtout vrai pour les gymnospermes : pour les angiospermes, le seuil de non-retour serait plutôt à 90 % d'embolie, correspondant plutôt au P_{88} que l'on retrouve aussi dans la littérature. Le P_{50} s'est imposé comme LE trait physiologique pour décrire la résistance au stress hydrique.

En anglais, on parle de PLC (*Percentage Loss of Conductance*). La valeur de pression pour ce paramètre (exprimée en méga Pascal, MPa) est négative : on parle de tension dans la colonne d'eau qui traverse la plante. En écophysiologie, cette tension est appelée « potentiel hydrique ». Plus la valeur de P_{50} est faible (i.e. plus elle est négative), plus une espèce est capable de tolérer de grandes forces de tension, donc plus elle sera dite résistante à l'embolie. À l'inverse, une espèce dont le P_{50} est élevé (i.e. faiblement négative, proche de 0), plus elle sera dite vulnérable.

Le P_{50} d'un taxon donné se calcule à partir d'une courbe de vulnérabilité à l'embolie (plusieurs moyens techniques existent pour l'obtenir).

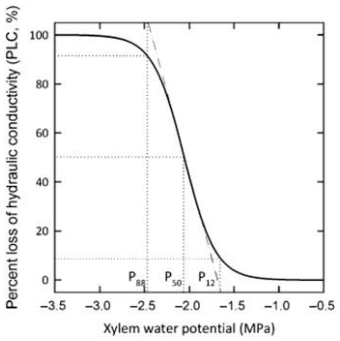


Figure 4 : Exemple de courbe de vulnérabilité à l'embolie

Problème : certaines méthodes pour obtenir les données peuvent être soumises à un biais de mesure, en particulier pour les angiospermes, avec pour conséquence de faire apparaître des espèces comme beaucoup plus vulnérables qu'elles ne le sont en réalité. Ainsi, la plupart des valeurs de P_{50} élevées (> -2 MPa) relevées dans la littérature sont en réalité douteuses. Dans AVEC, nous avons fait le choix de moissonner les valeurs de P_{50} se trouvant dans TRY, puis d'écarter les valeurs douteuses et de le compléter avec des sources fiables sélectionnées au cas par cas.

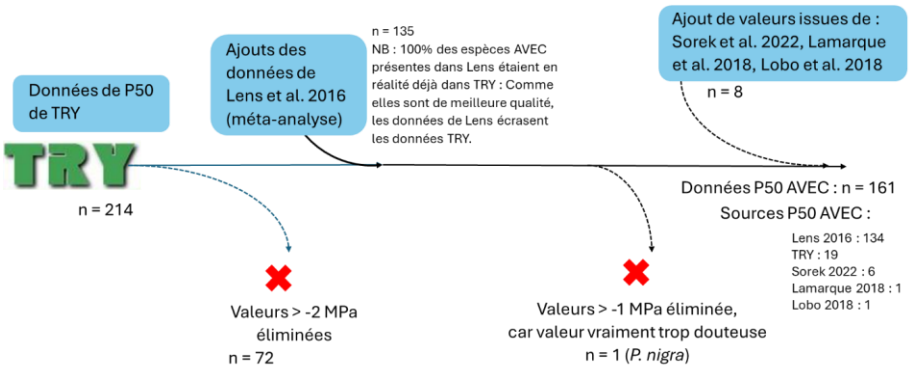


Figure 5 : Cheminement pour la construction de la base de données des P_{50}.

2.4.5. Les données de point de perte de turgescence

La turgescence est l'état hydrique d'une cellule végétale remplie d'eau, dont la vacuole exerce une pression positive sur les parois de la cellule, dite pression de turgescence. En deçà d'un certain seuil de potentiel hydrique, la cellule n'est plus en capacité de maintenir une pression positive : il s'agit du point de perte de turgescence. Les parties non lignifiées de la plante deviennent alors flasque.

Sur la face inférieure des feuilles, les stomates sont des pores qui permettent les échanges gazeux : sortie de H_20 (évapotranspiration) et entrée de CO_2 (nécessaire à la photosynthèse). L'ouverture des stomates nécessite que les deux cellules de garde qui la composent soient en état de turgescence. Une fois le point de perte de turgescence dépassé, les stomates sont fermés, la plante ne peut plus transpirer. Ce mécanisme passif permet de limiter les pertes en eaux.

Dans la littérature, le point de perte de turgescence permet de renseigner sur la fermeture stomatique. On le trouve sous les termes *turgor loss point* (noté TLP, P_{TLP} ou Ψ_{TLP}).

Pour AVEC, la première source investiguée pour ce paramètre est TRY, complétée ensuite par d'autres sources.

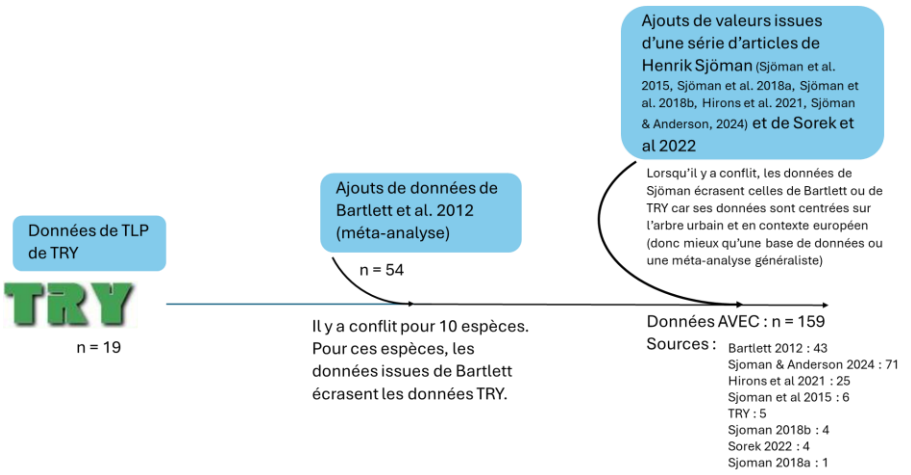


Figure 6 : Cheminement pour la construction de la base de données des TLP (point de perte de turgescence)

2.4.6. Les données de densité du bois et de surfaces foliaires spécifiques

Dans un premier temps, il a été envisagé d'importer ces données depuis TRY, qui agrège notamment pour la densité du bois les travaux de Chave et al. (2009) et Zanne (2010). Cependant, pour les 100 000 observations correspondant à 13 000 espèces, les données ne sont pas complètement homogénéisées quant aux définitions adoptées ni aux protocoles de mesure suivis.

Commenté [CL2]: J'ai nuancé (les données TRY sont tout à fait utilisables… c'est juste que les données Diaz sont encore meilleures !)

Les travaux ultérieurs de Díaz et al. (2016 et 2022) représentent une source bien plus qualitative. Les auteurs reprennent, nettoient, complètent homogénéisent et analysent les données de TRY. Environ 150 co-auteurs signent la publication de 2022, dont une vingtaine qui ont activement participé à l'analyse des données : un travail bien plus précis que ce que les moyens du projet AVEC ne permettent.

Les données AVEC de densité du bois et de surface foliaire spécifique (SLA) sont donc issues des travaux de Díaz et al.

2.4.7. Les données liées à la dimension des plantes à maturité

Mobilisées pour évaluer le potentiel d'ombrage et d'évapotranspiration des taxons, les paramètres suivants ont également été recherchés dans TRY :

- Hauteur maximale à maturité
- Largeur maximale à maturité (envergure)

TRY comporte ces informations pour 32 000 taxons mais un examen plus approfondi nous a montré que les valeurs disponibles pour le périmètre taxonomique AVEC ne semblaient pas cohérentes avec nos usages, pour deux raisons principales :

- Elles sont issues d'observations dans le monde entier, y compris de taxons exotiques dans leur biotope d'origine. Parmi eux, ceux qui sont cultivés en France pour l'ornement n'atteignent généralement pas les dimensions qu'on leur connaît dans leur milieu natif.
- Elles sont relevées à tous les stades de développement végétal, pas uniquement sur les spécimens matures. En conséquence, les données TRY liées aux dimensions des végétaux présentent une grande variabilité pour un même taxon, ce qui les rend difficilement exploitables.

Trier les données TRY en fonction de leur origine géographique ou du stade de développement du végétal s'est avéré trop chronophage, voire impossible étant donné que ces informations ne sont pas toujours indiquées ou facilement accessibles.

Pour ces raisons, nous nous sommes tournés vers les données Végébase-Floriscope, qui ont fait l'objet de différentes agrégations et vérifications, en phase avec les attentes des professionnels français du végétal. Nous avons ainsi pu renseigner les paramètres recherchés pour 950 taxons du périmètre AVEC.

2.5. Construction des indicateurs

Quelques rappels :

La construction des indicateurs est dépendante de la disponibilité des données sources. En effet, il n'est possible de les calculer que si des bases de données existent et si ces dernières recoupent suffisamment le périmètre taxonomique du projet. À ce sujet, l'ampleur du périmètre taxonomique AVEC impose d'utiliser des types de données facilement exploitables, autrement dit se présentant sous la forme de variables quantitatives ou normées.

À partir des facteurs environnementaux qui nous semblent pertinents pour l'étude (Cf. objectif #2.a), l'équipe projet a convenu de créer des potentiels reflétant les tolérances (chaleur, sécheresse) ou aptitudes (ombrage, transpiration, stockage carbone) des taxons.

2.5.1. Potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches

La construction de l'indicateur « potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches » repose sur l'assemblage de deux approches : par les niches climatiques et par les traits physiologiques. Une troisième approche par dires d'experts mobilisant le groupe miroir du projet AVEC a permis d'ajuster l'indice de confiance qui accompagne cette note.

Le calcul de cet indicateur est le fruit de plusieurs étapes :

1. **Définition d'un indice « niche climatique » :** chaque taxon est projeté sur le plan croisant les paramètres climatiques retenus (Températures maximales moyennes du mois le plus chaud, Cumul de précipitations du trimestre le plus sec). En fonction de sa position sur ce plan, une note sur 5 lui est attribuée. Le dessin de la grille permettant d'attribuer cette note a été déterminé en fonction de seuils de température et de pluviométrie tangibles pour les professionnels de France métropolitaine, et ajusté de manière itérative afin d'équilibrer autant que possible les effectifs pour chaque note. À l'issue de cette étape, 809 taxons disposent d'un indice « niche climatique ».

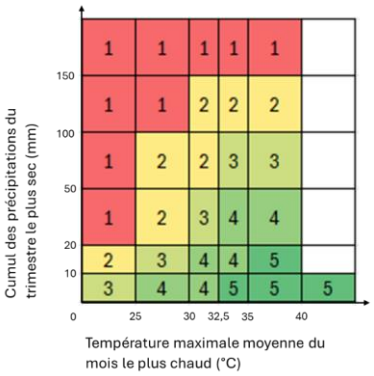


Figure 7 : Grille d'attribution de l'indice « niche climatique », en fonction de la position d'un taxon sur le plan croisant les paramètres climatiques retenus. Les seuils des intervalles de température et de cumul de précipitation retenus sont indiqués respectivement en abscisse et en ordonnée du graphique.

2. **Définition d'un indice « traits physiologiques » :** de la même manière, les données de P_{50} et de TLP sont discrétisées en 5 classes, fixées de manière à équilibrer autant que possible la distribution des effectifs entre chaque classe. Pour chaque taxon, le meilleur d'entre ces deux scores (i.e. le plus grand) est retenu pour obtenir l'indice « traits physiologiques ». Si un seul score est disponible, il est retenu. Si aucune valeur n'est disponible, la densité du bois est mobilisée et servira pour établir l'indice de confiance pour ce taxon. Ce dernier point n'est appliqué qu'aux Angiospermes, taxons pour lesquels il existe une corrélation relativement satisfaisante entre la densité du bois et le P_{50} (R^2=0.37, ce qui n'est pas le cas pour les Gymnospermes). À l'issue de cette étape, 270 taxons disposent d'un indice « traits physiologiques ».

   Les bornes retenues sont les suivantes :

   - P_{50} (MPa) : $]-\infty;-5]$, $]-5;-4]$, $]-4;-3]$, $]-3;-2]$, $]-2;0]$.
   - P_{TLP} (MPa) : $]-\infty;-3{,}5]$, $]-3{,}5;-3]$, $]-3;-2{,}5]$, $]-2{,}5;-2]$, $]-2;0]$.
   - Densité du bois (g/cm³) : $]0;0{,}284]$, $]0{,}284;0{,}448]$, $]0{,}448;0{,}56]$, $]0{,}56;0{,}84]$, $]0{,}84;+\infty]$.

3. **Calcul de l'indicateur « potentiel de résistance en conditions chaudes et sèches » :**

Commenté [CL3]: Si besoin, les bornes de Températures (en °C): (0,25] ; (25,30] ; (30,32.5] ; (32.5,35] ; (35,40] ; (40,Inf]
et de précipitations (en mm) : (0,10] ; (10,20] ; (20,50] ; (50,100] ; (100,150] ; (150,Inf]

Commenté [CL4]: Les bornes (en MPa) : P_{50} : (-Inf,-5] ; (-5,-4] ; (-4,-3] ; (-3,-2] ; (-2,0]
P_{TLP} : (-Inf,-3.5] ; (-3.5,-3] ; (-3,-2.5] ; (-2.5,-2] ; (-2,0]

Commenté [CL5]: Les bornes : Densité du bois en $g.cm^{-3}$. (0,0.284] ; (0.284,0.448] ; (0.448,0.56] ; (0.56,0.84] ; (0.84,Inf]

Commenté [PL6]: @Cédric Lemaire ?

Commenté [CL7R6]: Oui, seulement pour les angiospermes
Si besoin, j'ai mis à jour/ajouté la figure montrant la corrélation entre P50 et densité du bois (dernière diapositive du diapo méthode)

a. C'est l'indice « niche climatique » qui sert de base pour cet indicateur, car c'est la seule grandeur qui permet de qualifier le comportement du taxon vis-à-vis à la fois du stress thermique ET du stress hydrique.

b. L'indice « traits physiologiques » permet d'obtenir le score final. S'il est plus grand que l'indice « niche climatique », le score est augmenté d'un point. S'il est plus petit, le score est diminué d'un point. S'il est absent, alors l'indice « niche climatique » est repris tel quel.

   NB. L'écart entre les deux indices servira également pour établir l'indice de confiance lié à chaque taxon.

4. À l'issue de ces étapes, 786 taxons disposent d'un score de « potentiel de résistance en conditions chaudes et sèches ».

Par exemple, le Cèdre obtient un indice « niche climatique » de 2/5 car cette essence est peu résistante à la chaleur. Son indice « traits physiologiques » est de 5/5 car elle présente une très bonne tolérance à l'embolie. On est ici dans un cas où l'indice « traits physiologiques » est supérieur à l'indice « niche climatique ». Le score final de l'indice « potentiel de résistance en conditions chaudes et sèches » est dont son indice « niche climatique » + 1, soit 3/5.

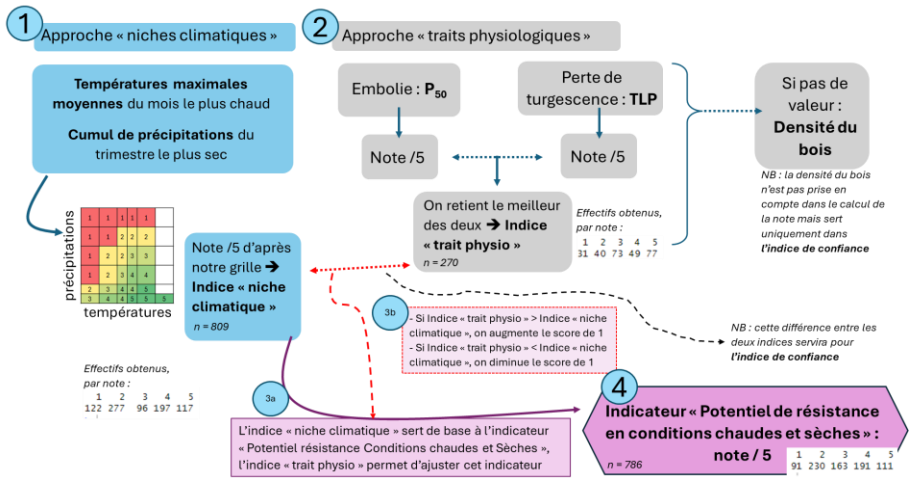


Figure 8 : Schéma de construction de l'indicateur « potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches »

2.5.2. Indice de confiance

Chaque score de « potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches » s'accompagne d'un indice de confiance. Les règles pour le déterminer sont les suivantes.

Additionnellement, chacun des 786 scores de « potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches » ont été transmis aux comités AVEC pour relecture, accompagnés de l'indice de confiance correspondant. Lorsque les membres du groupe miroir ont émis un doute sur un score, ce dernier n'est pas modifié mais l'indice de confiance qui l'accompagne est dégradé d'un point.

Si l'indice de confiance est de 0/3 pour un taxon, alors le potentiel de résistance climatique ne rejoint pas la base de données finale de AVEC et n'est pas valorisé dans Végébase-Floriscope.

Valeur de l'indice de confiance	Règles : ce score est attribué si…				
3/3	Les **2 approches** « niche clim. » et « traits physio. » sont disponibles	ET	Les 2 approches sont **concordantes** (0 ou 1 point d'écart entre chaque indice)		
2/3	Les **2 approches** sont disponibles mais le **proxy** « densité du bois » a dû être utilisé	OU	Les **2 approches** sont disponibles mais **légèrement discordantes** (2 points d'écart entre chaque indice)	OU	Les **données** de niche climatique sont **douteuses** : peu d'occurrences (n<50) ou présentant une trop grande variabilité*
1/3	Les **2 approches** sont disponibles mais **discordantes** (3 ou 4 points d'écart entre chaque indice)	OU	**1 seule approche** est disponible	OU	Au moins deux des trois conditions du score 2/3 sont réunies
0/3	Au moins deux des trois conditions du score 1/3 sont réunies.				
-1	Les membres du **groupe miroir AVEC** ne sont pas d'accord avec le score de résistance climatique				

Tableau 3 : Règles pour l'établissement de l'indice de confiance

En conséquence, l'affichage du score de résistance climatique dans Floriscope s'accompagne systématiquement de la valeur de l'indice de confiance et d'un des commentaires suivants.

Valeur de l'indice de confiance	Commentaire correspondant				
3/3	Résultat considéré comme robuste.				
2/3	Les approches mobilisées donnent des résultats légèrement divergents pour cette espèce.	OU	Certaines données source sont de qualité inégale (ex : approximations, grande variabilité ou faible effectif).		
1/3	Attention, les approches mobilisées donnent des résultats contradictoires pour cette espèce.	OU	Attention, les données sources sont de qualité insatisfaisante pour cette espèce.	OU	Attention, résultat partiel : toutes les analyses n'ont pas pu être conduites faute de données.
0/3	Les sources investiguées ne nous ont pas permis de calculer un indicateur.				

Tableau 4 : Commentaires accompagnant l'indicateur « potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches », en fonction de l'indice de confiance

2.5.3. Potentiel de rafraîchissement

Dans AVEC, le potentiel de rafraîchissement est traduit par deux indicateurs distincts : le Potentiel d'ombrage et le Potentiel de transpiration estivale. Ils mobilisent les données source suivantes :

- Dimensions du végétal à maturité : hauteur et largeur maximales potentielles (H, D)
- Surface foliaire spécifique (SLA)
- Point de perte de turgescence (TLP)

Ces deux potentiels sont établis suivant le cheminement suivant :

1. **Potentiel d'ombrage**

   a. Les dimensions du végétal à maturité permettent d'établir des classes de volume potentiel à maturité. Pour modéliser le volume théorique (V_{th}) d'un houppier à partir des données disponibles, le calcul du volume d'une demi-ellipse est réalisé à partir de la hauteur (H) et de la largeur (D) potentielles du taxon à maturité.

$$V_{th} = \frac{1}{2}\left(\frac{4}{3}\pi \times \frac{D^2}{4} \times \frac{2}{3}H\right)$$

   b. Ces volumes sont répartis dans 5 classes, avec les seuils suivants, en mètres cubes. Ces classes donnent la valeur initiale de l'indicateur « Potentiel d'ombrage », sous forme d'une note /5.

$$V \in]0\,;2{,}5\,]m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 1/5$$
$$V \in]2{,}5\,;5\,]m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 1{,}5/5$$
$$V \in]5\,;52{,}5]\ m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 2/5$$
$$V \in]52{,}5\,;100]\ m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 2{,}5/5$$
$$V \in]100\,;250]\ m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 3/5$$
$$V \in]250\,;400]\ m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 3{,}5/5$$
$$V \in]400\,;950]\ m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 4/5$$
$$V \in]950\,;1\,500]\ m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 4{,}5/5$$
$$V > 1\,500\ m^3 \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage = 5/5$$

   c. Ce score est ensuite modulé en fonction du rapport H/D du taxon. L'ombrage étant le plus homogène pour les végétaux présentant un port dit « en boule », un bonus d'un demi-point est accordé aux taxons présentant un rapport H/D proche de 1.

$$H/D \in [0{,}75\,;1{,}25] \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage + 1/2$$

   d. Le score est également modulé en fonction des caractéristiques des feuilles. L'ombrage étant maximal pour les taxons à feuilles fines (Kim et al., 2024; Sharmin et al., 2023), un bonus d'un demi-point est accordé aux taxons présentant un grand SLA (le lien entre SLA et épaisseur de la feuille étant établi par Wilson et al., 1999).

$$SLA > 0{,}02\ m^2/g \leftrightarrow Potentiel\ d'ombrage + 1/2$$

   e. La note est ensuite arrondie à l'entier inférieur, par exemple un taxon noté 2,5 conservera une note finale de 2.

2. **Potentiel de transpiration estivale**

   a. Les taxons sont répartis en trois classes selon leur point de fermeture stomatique.

$$LTP \leq -3\ MPa \leftrightarrow classe\ 1$$
$$LTP \in]-3\,;-2{,}5]\ MPa \leftrightarrow classe\ 2$$
$$LTP \in]-2{,}5\,;0]\ MPa \leftrightarrow classe\ 3$$

   b. Les taxons sont répartis en trois classes selon leur volume potentiel à maturité.

Commenté [CL8]: Attention, l'acronyme anglais est «TLP» (Turgor Loss Point)

Commenté [CL9]: Formule : (1/2)*(4/3)*pi*(D^2)/4)*(2*H/3)

Commenté [CL10]: Un détail méthodo : en réalité chacune des 5 classes a été divisée en 2 sous-classes :
]0.0;2.5] -> note = 1
]2.5;5.0] -> 1,5
]5.0;52.5] -> 2
]52.5;100.0] -> 2,5
]100.0;250.0] -> 3
]250.0;400.0] -> 3,5
]400.0;950.0]-> 4
]950.0;1500.0]-> 4,5
<1500.0 -> 5

Puis :
On applique les étapes c et d (bonus de 0,5 dus au port et ou au SLA)
On ne garde que la valeur entière (un taxon qui finit avec 2,5 est donné comme ayant un potentiel d'ombrage de 2)

Commenté [PL11]: @Cédric Lemaire quelle source nous permet de dire cela stp ?

Commenté [CL12R11]: Pas de source ! Cela provient de l'arbitrage en interne défini lors d'un point d'avancement, après avoir abandonné la piste du LAI : on cherchait un critère permettant de rendre compte de la qualité de l'ombre.
Le port en boule permet de rendre compte de la qualité de l'ombrage produit, avec, à surface de feuillage constante, une ombre qui sera la plus dense et homogène possible. Dense car le rayon lumineux devra traverser un volume de feuillage important (au contraire d'un port étalé). Et homogène car les variations seront minimales quelles que soient les variation d'indicence du rayon lumineux, c'est à dire l'heure de la journée (au contraire d'un port colonnaire).

Commenté [CL13]: La hauteur du houppier retenue pour le calcul est 2H/3 (CàD les ⅔ de la hauteur totale de l'individu telle que donnée par Floriscope)

Commenté [PL14]: @Cédric Lemaire idem, quelle source stp ?

Commenté [CL15R14]: Sharmin et al. 2023, Kim et al. 2024
(dans le zotéro)
Pour lien entre SLA et épaisseur de la feuille : Wilson et al. 1999

$$V \leq 100\ m^3 \leftrightarrow classe\ A$$
$$V \in]100\ ;\ 1\,500]\ m^3 \leftrightarrow classe\ B$$
$$V > 1\,500\ m^3 \leftrightarrow classe\ C$$

c. Chacune de ces classes est traduite par un commentaire lié (i) à la capacité de maintien de l'évapotranspiration malgré le stress hydrique et (ii) au périmètre dans lequel ce rafraîchissement pourra être perçu. Les commentaires sont les suivants :

« Capacité [1. faible ; 2. modérée ; 3. forte]à maintenir la transpiration en conditions sèches. »

« Effet rafraîchissant potentiellement perceptible dans un [A. petit ; B. modéré ; C. grand] périmètre. »

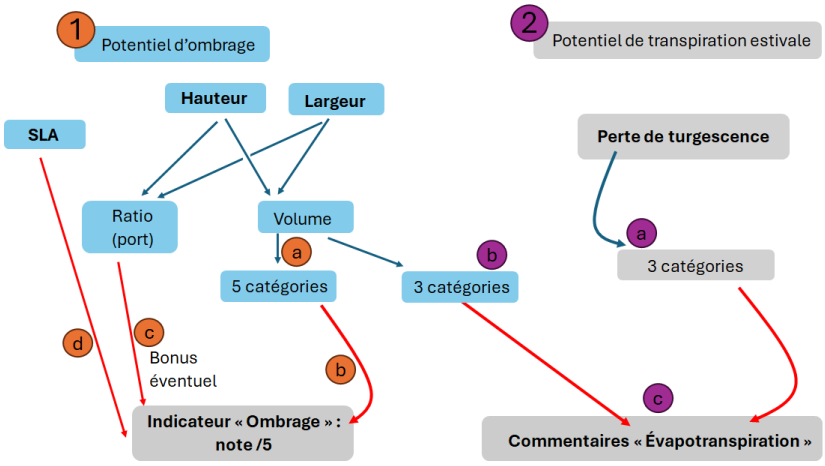


Figure 9 : Schéma de construction des indicateurs « Potentiel d'ombrage » et « Potentiel de transpiration estivale ».

2.5.4. Potentiel de séquestration carbone

Les critères mobilisés pour cet indicateur sont décrits dans le tableau ci-dessous. Leur assemblage dans un tableau à trois dimensions ci-après permet de fixer le « Potentiel de séquestration carbone » (note /5) qui intègre les résultats du projet AVEC.

Critère	Valeur	Définition
Grandeur	1	> 20 m
	2	de 15 à 20 m
	3	de 10 à 15 m
	4	< 15 m
Longévité	Forte	> 250 ans
	Moyenne	de 150 à 250 ans
	Faible	< 150 ans
Densité du bois (g/cm^3)	Forte	de 0,560 à 0,840
	Moyenne	de 0,448 à 0,560
	Faible	de 0,284 à 0,448
	Très faible	< 0,284

Tableau 5 : Définition des critères Grandeur, Longévité et Densité du bois

Longévité	Faible			
Grandeur	1	2	3	4
Densité du bois				
Forte	3	2	2	1
Moyenne	4	3	2	2
Faible	5	4	3	2
Très faible				3

Longévité	Moyenne			
Grandeur	1	2	3	4
Densité du bois				
Forte	4	3	2	2
Moyenne	5	4	3	2
Faible	5	5	4	3
Très faible				4

Longévité	Forte			
Grandeur	1	2	3	4
Densité du bois				
Forte	5	4	3	2
Moyenne	5	5	4	3
Faible	5	5	5	4
Très faible		5		5

Tableau 6 : Assemblage des critères Grandeur, Longévité et Densité du bois pour composer le Potentiel de séquestration carbone

3. Bilan : production de critères et d'indicateurs

3.1. Périmètre taxonomique

Les premières étapes du projet ont permis de circonscrire les travaux à 2 094 taxons pour les critères principaux : 1- résistance climatique en conditions chaudes et sèches, 2- potentiel de rafraîchissement, 3- séquestration carbone. Pour les attentes concernant la tolérance aux submersions temporaires, la liste issue des recherches bibliographiques se compose de 180 essences d'arbres. Ces périmètres taxonomiques sont décrits dans le tableau ci-après.

Périmètre	Lien pour accéder à la liste sur Floriscope	QR Code
Périmètre taxonomique global investigué	https://www.floriscope.io/listes/12518/projet-a-v-e-c-adaptation-du-vegetal-au-climat-de-demain-perimetre-taxonomique-v5 ⇨ **Total de 2 094 taxons, représentant 1 200 espèces et 390 genres**	
Liste des taxons avec une information sur la tolérance à la submersion temporaire	https://www.floriscope.io/listes/14419/180-arbres-tolerant-les-inondations-temporaires ⇨ **Total de 180 arbres**	

Tableau 7 : Périmètres taxonomiques investigués dans le projet AVEC

3.2. De nouveaux critères et indicateurs

Pour rappel, le projet AVEC vise à :

- Identifier des **données brutes**, décrivant les caractéristiques des taxons visés, telles qu'elles se trouvent dans les documents ou bases de données sources, c'est-à-dire telles qu'elles ont été travaillées et présentées par leurs producteurs.
- Exploiter ces données sous forme de **critères**, c'est-à-dire ayant été retravaillées à des fins d'agrégation, d'harmonisation et de hiérarchisation.
- Produire des **indicateurs**, c'est-à-dire des indices composites issus de la combinaison de différents critères, permettant de situer une essence sur un gradient selon son potentiel. La méthode de production de ces indicateurs est décrite dans la partie précédente.

Commenté [CG16]: @Pauline Laille tu verras s'il faut rapatrier ce paragraphe plus haut.

Les données identifiées dans le cadre du projet ont permis d'élaborer de nouveaux critères ou indicateurs à l'échelle de chacun des taxons pour lesquelles les données existaient. Ils sont décrits dans le tableau ci-après.

Catégorie	Critères / Indicateurs	Unité	Signification / Éléments de compréhension à destination des utilisateurs de Floriscope (info-bulle)
Comportement en conditions chaudes et sèches	Potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches	/	Le potentiel de résistance climatique, noté de 1 à 5, est calculé à partir des autres données présentées ci-dessous (5/5 indique le plus haut degré de tolérance à des conditions à la fois chaudes et sèches). Un indice de fiabilité noté de 1 à 3 précise la confiance dans les données sources (3/3 indique les données les plus robustes).
	Vulnérabilité à l'embolie (P50)	MPa	Potentiel hydrique, en mégapascal, à partir duquel les effets de l'embolie réduisent de 50% la conductance hydraulique de la tige. Il y a alors risque de déconnexion hydraulique entre racines et feuilles entraînant dommages (défoliation, dépérissement partiel, mort). Plus cette valeur est négative,

			plus la plante tolère un stress hydrique important.
	Point de perte de turgescence	MPa	Potentiel hydrique, en mégapascal, à partir duquel les stomates se ferment et la plante cesse ses échanges gazeux avec l'atmosphère (évapotranspiration, photosynthèse). Plus cette valeur est négative, plus la plante tolère un stress hydrique important.
	Température maximale du mois le plus chaud	T°C	Moyenne des maximas quotidiens durant le mois le plus chaud (1990-2020). C'est la limite statistique à partir de laquelle on ne trouve plus l'espèce en milieu naturel.
	Cumul de précipitations du trimestre le plus sec	Mm	Somme sur les trois mois consécutifs de l'année les plus secs (1990-2020). C'est la limite statistique à partir de laquelle on ne trouve plus l'espèce en milieu naturel.
	Densité du bois	g/cm^3	Rapport entre la masse sèche de bois et son volume. Elle renseigne sur la stratégie de l'essence en termes de croissance, longévité, tolérance aux stress etc. Plus le bois de l'essence est dense, plus elle est susceptible de tolérer un stress hydrique important.
Potentiel de rafraîchissement	Potentiel d'ombrage	/	Le potentiel d'ombrage, noté de 1 à 5, tient compte du volume de houppier potentiel à maturité, de sa forme ainsi que de l'épaisseur des feuilles, lorsque les données sont disponibles (5/5 indique le meilleur ombrage potentiel).
	Potentiel de transpiration estivale	/	La capacité de l'essence à transpirer en conditions sèches dépend du point de perte de turgescence. Le périmètre potentiellement rafraîchi est fonction du volume potentiel de l'essence à maturité (hauteur, largeur).
	Surface foliaire spécifique	cm^2/g	Rapport entre la surface foliaire et la masse sèche de la feuille (aussi appelé SLA). Il renseigne sur l'épaisseur de la feuille. Plus le SLA est grand, plus le potentiel d'évapotranspiration de la plante est élevé.
Carbone	Potentiel de séquestration carbone	/	La capacité de stockage de carbone tient compte de trois facteurs : la grandeur, la longévité, la densité du bois. Le potentiel de séquestration carbone s'appuie sur une méthode développée dans le cadre du

			barème de l'arbre VIE/BED (Plante & Cité, CAUE 77, Copalme, 2020).
	Longévité potentielle	années	La durée de vie potentielle du taxon. Les valeurs s'appuient sur les recherches bibliographiques menées dans le cadre du barème de l'arbre VIE/BED (Plante & Cité, CAUE 77, Copalme, 2020).

Tableau 8 : Critères et indicateurs produits dans le cadre du programme AVEC

3.3. Nombre d'essences renseignées

3.3.1. Nombre d'essences renseignées : bilan par critères et indicateurs

Nature	Libellé	Nombre de taxons renseignés	
		Parmi le périmètre taxonomique de AVEC (2 094 taxons)	Données supplémentaires identifiés par opportunité
Indicateur	**Potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches***	760	23
Critères	Niches climatiques : - Température maximale du mois le plus chaud - Cumul de précipitations du trimestre le plus sec	733	23
Critère	P_{50}	158	3
Critère	Perte de turgescence (TLP)	154	2
Critère	Densité du bois	383	7
Indicateur	**Potentiel d'ombrage**	820	81
Indicateur	**Transpiration estivale**	154	2
Critère	Surface foliaire spécifique (SLA)	542	11
Indicateur	**Potentiel de séquestration carbone**	892	740
Critère	Longévité potentielle	892	740

Tableau 9 : Bilan des données renseignées par taxons en fonction des critères et indicateurs.

*[Pour rappel, cet indicateur se construit à partir deux approches : niche climatique et/ou de critères physiologiques (P_{50}, densité du bois). Seuls 145 taxons ont des données sur les deux approches. Pour les autres, l'indicateur a été construit sur une seule approche avec un indice de confiance dégradé.]

3.3.2. Nombre d'essences renseignées : bilan taxonomique et par types de plante

Sur le total des 2 090 plantes du périmètre taxonomique, on en compte 1 276 avec au moins un critère renseigné.

Bilan taxonomique	Espèces : 1 223 (ex : *Acer campestre*, l'érable champêtre) Infraspécifiques : 50 (ex : *Myrtus communis* subsp. *tarentina*, le myrte de Tarente)
	Taxons horticoles : 3 (ex : *Salix x pendulina* (Tristis Group), les saules pleureurs hybrides)
Bilan par type de plantes	Arbres (feuillus et conifères) : 491 Petits arbres et grands arbustes : 569
	Grimpantes : 98 Herbacées et intermédiaires (palmiers, bambous, yucca, cordyline, fougère arborescente, cactées…) : 75
	Arbustes petits : 262

Tableau 10 : Bilan des données renseignées par nature taxonomique et types de plante sur les indicateurs et critères liés au comportement en conditions chaudes et sèches et au potentiel de rafraîchissement.

4. Accès aux données et indicateurs

4.1. De nouveaux contenus dans Floriscope.io accessibles à tous

Floriscope, composé d'un site web et d'une application mobile, est l'outil numérique gratuit développé par Plante & Cité avec le soutien de l'Interprofession de l'horticulture, du paysage et de la fleuristerie, VALHOR. Il s'appuie sur la base de données Végébase centralisant un référentiel taxonomique de plus de 200 000 noms de plantes sauvages et cultivées, et utilisées pour le paysage. Le projet compte plus de 130 partenaires, partageant des photos, des données ou référençant des collections végétales ou des catalogues de producteurs français.

La finalité de Végébase-Floriscope est d'aider les professionnels et futurs professionnels (publics apprenants) des filières de l'horticulture, du paysage et de la nature en ville, à mieux connaître, choisir et trouver leurs végétaux.

La consultation du site ou le téléchargement de l'application mobile sont entièrement gratuits, de même que la création d'un compte. Ce dernier permet à l'utilisateur de mobiliser une palette de fonctionnalités telles que : la création et l'édition de listes (palettes végétales de projets pour les paysagistes ou listes de révisions pour les étudiants, par exemple), la mise en favoris de plantes, de catalogues ou de listes, le partage sous forme de liens ou de QR-codes des fiches et listes, les exports (PDF de fiches, Excel de listes).

Grâce au projet AVEC, de nouvelles données viennent enrichir les fiches plantes pour lesquelles les données existent. L'ensemble de ces nouvelles informations sont regroupées dans une nouvelle catégorie : « Changement climatique ». En complément, un message s'affiche dans la partie haute des fiches plantes concernées pour attirer l'attention sur ces nouveaux contenus, faire le lien sur la fiche du projet et le périmètre taxonomique :

*« Ce taxon a été étudié dans le cadre du projet **A.V.E.C.** (Adaptation du VEgétal au Climat de demain), dans le cadre d'un partenariat entre l'ADEME, le CEREMA et Plante & Cité et avec le soutien de Signature*

Biodiversité. Retrouvez les informations issues de ce projet dans l'onglet "Changement Climatique" de la description détaillée. »

Dans le processus complexe de choix des végétaux pour un projet d'aménagement, les utilisateurs pourront désormais, grâce au projet AVEC, comparer des essences sur les critères de tolérance aux conditions chaudes et sèches, d'apport pour le rafraichissement ou la séquestration carbone.

De même, les gestionnaires d'arbres pourront trouver des indications sur les essences de leur patrimoine les plus vulnérables et ainsi étudier les possibilités d'atténuer les stress subis par différentes actions (désimperméabilisation, paillage, apport de matière organique, et même irrigation pour les spécimens les plus précieux), voire l'hypothèse de leur remplacement à terme.

4.2. De nouvelles données dans Végébase, accessibles aux porteurs d'outils

Basée sur un dictionnaire exclusif et de rang international de plus de 200 000 noms de plantes cultivées (espèces, cultivars… et leurs synonymes sur le marché), Végébase mutualise et rend accessible les connaissances botaniques, agronomiques et écologiques. L'outil présente également plus de 94 000 photographies sur 22 000 taxons, grâce à des contributeurs engagés et à un méticuleux travail de contrôle de l'authenticité variétale des plantes représentées.

Les jeux de données sont englobés dans une API et sont administrés par une interface jouant également le rôle de Back Office pour Floriscope. Il est possible d'accéder à ces données via l'API de Végébase. De même, Plante & Cité peut extraire des données sous la forme d'un tableur sur un périmètre taxonomique spécifique en lien avec les besoins des porteurs d'outils qui en feraient la requête auprès de Plante & Cité. Quel que soit le mode choisi, les données sont accessibles sous certaines conditions contractuelles, proposées par Plante & Cité.

Figure 10 : Capture d'écran d'une fiche plante de Floriscope.io au sein de laquelle figure la nouvelle rubrique « Changement climatique » avec l'ensemble des critères et indicateurs obtenus.

Exemple accessible : https://www.floriscope.io/plantes/acer-monspessulanum

5. Perspectives pour acquérir de nouvelles données

Cette étude a permis de faire un état des lieux des données disponibles sur le périmètre taxonomique du programme AVEC. Comme nous l'avons vu, les connaissances actuelles sur la vulnérabilité des arbres aux facteurs de stress urbains existants restent rares et ne sont disponibles que pour un nombre limité d'espèces et de facteurs de stress spécifiques.

Certaines catégories de végétaux, telles que les végétaux horticoles, les arbustes ou les plantes grimpantes, sont globalement peu étudiées et l'on dispose de peu de données les concernant. Or, pour exploiter potentiellement toute cette diversité végétale, il serait nécessaire de disposer des données utiles pour chacune des approches travaillées : niches climatiques, traits physiologiques, caractéristiques intervenant dans les potentiels de transpiration et d'ombrage.

5.1. Voies d'acquisition potentielles

Critères / Indicateurs	Méthodes d'acquisition
Potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches	▪ À construire selon la méthode AVEC à partir des critères ci-dessous.
Vulnérabilité à l'embolie (P_{50})	▪ Tenir compte de l'actualisation de la base de données TRY ▪ Nouvelles mesures acquises en laboratoire ▪ Accès à « *Xylem Functional Traits Database* » (base de données en cours de construction lors du projet AVEC)
Point de perte de turgescence (TLP)	▪ Tenir compte de l'actualisation de la base de données TRY ▪ Nouvelles mesures acquises en laboratoire
Température maximale du mois le plus chaud	▪ Tenir compte de l'actualisation des données de niches climatiques dans TreeGOER ▪ Utiliser la méthode TreeGOER à partir d'autres données de répartition que celles du GBIF, ou sur d'autres végétaux que le périmètre TreeGOER (essentiellement des grands arbres).
Cumul de précipitations du trimestre le plus sec	
Densité du bois	▪ Accès à « *Xylem Functional Traits Database* » (base de données en cours de construction lors du projet AVEC) ▪ Approfondissement, recherche de nouvelles sources de données scientifiques.
Potentiel d'ombrage	▪ Acquisition expérimentale de LAI (*Leaf Index Area*) sur un grand nombre de taxons. Actuellement, ces données n'existent que pour quelques taxons utilisés comme modèles dans des programmes de recherche (ex : https://cooltrees.hub.inrae.fr/). ▪ Acquisition de données terrain de volume foliaire d'arbres via la technologie LIDAR (exemple des données produites par la Startup GreeHill : https://www.greehill.com/). ▪ Pour les arbres et les grimpantes, affiner la méthode d'évaluation par l'acquisition de données sur le port des végétaux et l'élaboration d'un système de pondération en fonction du port.
Potentiel de transpiration estivale	▪ Pour le point de perte de turgescence (TLP) qui entre en compte dans ce potentiel, voir plus haut. ▪ Actualisation de l'état de l'art international.

Surface foliaire spécifique (SLA)	▪ Tenir compte de l'actualisation de la base de données TRY. ▪ Acquérir de nouvelles mesures en laboratoire.
Potentiel de séquestration carbone	▪ Actualisation de l'état de l'art international. ▪ Reprendre la méthode utilisée en s'appuyant sur la longévité potentielle ainsi que les connaissances sur les dimensions des taxons (disponibles dans Végébase et accessibles depuis Floriscope). ▪ Adapter la méthode aux arbustes et plantes grimpantes.
Longévité potentielle	▪ Actualisation de l'état de l'art international, recherche dans des bases de données. ▪ Développer un proxy sur la longévité des arbres tenant compte de leur durée de vie observée en ville, par groupe taxonomique. ▪ Adapter la méthode aux arbustes, plantes grimpantes et autres typologies

Tableau 11 : Pistes pour l'acquisition de nouvelles données sur les critères investigués dans le cadre du programme AVEC

5.2. Pistes partenariales

5.2.1. Réseaux d'observations de plantations urbaines pour les données de longévité

Certains critères d'intérêt (ex : longévité) pourraient être acquis par la mise en place d'observations de végétaux plantés dans des contextes urbains tels que :

- Des espaces dédiés à la conservation comme les arboreta ou des jardins de collections (ex : Jardins Botaniques de France, réseaux internationaux de jardins botaniques et d'arboreta via le réseau Botalista),
- Des jardins d'acclimatation (ex : Jardin de la Villa Thuret),
- Des patrimoines arborés de collectivités territoriales.

Bien que non naturels, ces contextes de plantation peuvent être favorables à l'expression de la durée de vie maximale des taxons.

5.2.2. Acquisition de données de modélisation pour les niches bioclimatiques

Précédemment, nous avons vu que les données sur les niches bioclimatiques mobilisées dans le projet sont issues de la base de données TreeGOER, associant des données caractérisant des niches climatiques et les données du GBIF pour 48 000 espèces d'arbres.

Cette base de données étant en évolution régulière, il pourrait être envisagé de solliciter un partenariat auprès des instigateurs de TreeGOER pour proposer une liste de taxons sur laquelle le travail de croisement des niches climatiques et des données du GBIF pourrait être fait prioritairement.

Dans un second temps, la méthode TreeGOER pourrait être utilisée à partir d'autres données que celles du GBIF – qui inclut essentiellement les grands arbres – pour acquérir les données de niches bioclimatiques sur les arbustes et les plantes grimpantes ainsi que les taxons horticoles.

5.2.3. Évaluation du niveau de confiance de l'indicateur par dires d'experts

La capitalisation de retours d'expériences est une piste intéressante pour questionner les données issues de modélisations ou d'expérimentations. Les « dires d'experts » peuvent apporter du crédit à ces données. Ils peuvent aussi lever des incohérences à traduire par un niveau de prudence supérieur (indice

de confiance). La question est de savoir comment organiser ces retours d'expérience et avec quelles méthodes de travail les faire émerger.

Il existe une publication scientifique témoignant de l'utilisation de la **méthode de Delphes** (en anglais *Delphi*) avec des experts en foresterie urbaine pour identifier la tolérance des espèces d'arbres urbains communément plantées dans le nord-est de l'Amérique du Nord à de multiples facteurs de stress urbains - pollution de l'air, compactage du sol, sels de déglaçage, insectes et maladies, vents forts, tempêtes de verglas, neige, sécheresse et températures extrêmes - ainsi qu'à évaluer les caractéristiques susceptibles d'illustrer la capacité d'une espèce à faire face à ces facteurs de stress (Carol-Aristizabal, M. et al, 2024). Cette méthode est une approche structurée et itérative utilisée pour recueillir les idées et les opinions d'un groupe d'experts afin de parvenir à un consensus sur un sujet spécifique. Elle pourrait être mise en place dans d'autres contextes biogéographiques et ainsi compléter la démarche en offrant un contrôle supplémentaire.

5.2.4. Acquisition de données par des mesures expérimentales au laboratoire

Certaines données nécessiteraient de faire l'objet de mesures au laboratoire pour les taxons les moins bien renseignés :

- Le LAI (*Leaf Area Index*),
- Le volume foliaire via la technologie Lidar (exemple des données produites par la Startup GreeHill : https://www.greehill.com/),
- Le P_{50} pour la vulnérabilité à l'embolie,
- Le point de perte de turgescence,
- La densité du bois.

L'acquisition de ces données requiert cependant la mise au point de protocoles d'échantillonnage adaptés de façon à tenir compte de la variabilité infraspécifique propre à chacune des espèces et à l'expression des conditions de leur développement (facteurs externes), notamment en milieu urbain et sous le climat propre à l'Europe de l'Ouest.

6. Conclusion

6.1. Bilan des actions de communication

Table-ronde et conférence de presse « Choix des végétaux face au changement climatique : lancement du projet AVEC dans le cadre d'un partenariat Plante & Cité, ADEME et CEREMA » le 23/05/2023, lors de l'Assemblée Générale de Plante & Cité à l'Association des Maires de France (Paris).

Communiqué de presse « Plante & Cité, l'ADEME et le Cerema s'allient autour du projet AVEC, Adaptation du végétal au climat de demain » du 31 mai 2023 élaboré par Plante & Cité.

Plusieurs articles dans la presse :

- 25 mai 2023 – La Gazette des communes : « Un projet pour adapter le végétal urbain au climat de demain »
- 24 mai 2023 – Le Moniteur : « Le végétal en ville se met au service de l'adaptation climatique »
- 25 mai 2025 – Agri-City : « Le projet AVEC "Adaptation du VEgétal au Climat de demain" est lancé ! »
- 1er juin 2023 – Actu-Environnement : « Un projet pour identifier les végétaux les plus résistants au changement climatique en ville »
- 2 juin 2023 – La Rédaction JAF Info : « Plante & Cité, L'Ademe et le Cerema s'allient autour du projet « AVEC », Adaptation du VEgétal au Climat de demain »
- 6 juin 2023 – Heure du Pro : « AVEC pour adaptation du végétal au climat de demain »

- 15 juillet 2023 – Energie Plus : « Recenser les capacités d'adaptation et de rafraîchissement des plantes »
- 11 Mars 2024 – La Gazette des communes : « Arbres en ville : une politique à l'épreuve de l'adaptation »

D'autres communications seront réalisées à l'issue du projet au cours du printemps-été 2025.

6.2. Bilan des actions de diffusion des connaissances

Dans le cadre de sa programmation, Plante & Cité a proposé un webinaire sur « Adaptation des végétaux au climat de demain (projet AVEC) » le 21 février 2025. Il s'agissait e présenter tout le travail réalisé, depuis la définition des taxons étudiés, jusqu'aux premiers résultats obtenus en passant par la méthodologie de travail adoptée. Au total, 425 participants se sont connectés pour suivre le webinaire (sur un total de 674 inscrits). Le webinaire est accessible en replay aux quelques 6000 comptes utilisateurs des structures adhérentes de Plante & Cité.

L'année 2025 sera l'occasion d'autres temps de valorisation :

- Conférence au Salon Paysalia des professionnels du paysage à Lyon (Eurexpo) du 3 au 5 décembre 2025.
- Conférence au congrès de la fédération française des producteurs en horticulture et pépinière à Brest du 26 au 27 juin 2025.

Toutes les opportunités n'ont pas encore été identifiées à la date de rédaction de ce rapport.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adams, H. D., Collins, A. D., Briggs, S. P., Vennetier, M., Dickman, L. T., Sevanto, S. A., Garcia-Forner, N., Powers, H. H., & McDowell, N. G. (2015). Experimental drought and heat can delay phenological development and reduce foliar and shoot growth in semiarid trees. Global Change Biology, 21(11), 4210 4220. https://doi.org/10.1111/gcb.13030

Adams, H. D., Macalady, A. K., Breshears, D. D., Allen, C. D., Stephenson, N. L., Saleska, S. R., Huxman, T. E., & McDowell, N. g. (2010). Climate-Induced Tree Mortality : Earth System Consequences. Eos, Transactions American Geophysical Union, 91(17), 153 154. https://doi.org/10.1029/2010EO170003

Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. Ecosphere, 6(8), art129. https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1

Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest Ecology and Management, 259(4), 660 684. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001

Anderegg, W. R. L., Anderegg, L. D. L., Kerr, K. L., & Trugman, A. T. (2019). Widespread drought-induced tree mortality at dry range edges indicates that climate stress exceeds species' compensating mechanisms. Global Change Biology, 25(11), 3793 3802. https://doi.org/10.1111/gcb.14771

Anderegg, W. R. L., Hicke, J. A., Fisher, R. A., Allen, C. D., Aukema, J., Bentz, B., Hood, S., Lichstein, J. W., Macalady, A. K., McDowell, N., Pan, Y., Raffa, K., Sala, A., Shaw, J. D., Stephenson, N. L., Tague, C., & Zeppel, M. (2015). Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. New Phytologist, 208(3), 674 683. https://doi.org/10.1111/nph.13477

Anderegg, W. R. L., Klein, T., Bartlett, M., Sack, L., Pellegrini, A. F. A., Choat, B., & Jansen, S. (2016). Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(18), 5024 5029. https://doi.org/10.1073/pnas.1525678113

Archambeau, J., Ruiz-Benito, P., Ratcliffe, S., Fréjaville, T., Changenet, A., Muñoz Castañeda, J. M., Lehtonen, A., Dahlgren, J., Zavala, M. A., & Benito Garzón, M. (2020). Similar patterns of background mortality across Europe are mostly driven by drought in European beech and a combination of drought and competition in Scots pine. Agricultural and Forest Meteorology, 280, 107772. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107772

Augspurger, C. K. (2013). Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years : Spring damage risk is increasing. Ecology, 94(1), 41 50. https://doi.org/10.1890/12-0200.1

Bartlett, M. K., Scoffoni, C., & Sack, L. (2012). The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes : A global meta-analysis. Ecology Letters, 15(5), 393 405. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01751.x

Beech, E., Rivers, M., Oldfield, S., & Smith, P. P. (2017). GlobalTreeSearch : The first complete global database of tree species and country distributions. Journal of Sustainable Forestry, 36(5), 454 489. https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1310049

Blackman, C. J., Billon, L.-M., Cartailler, J., Torres-Ruiz, J. M., & Cochard, H. (2023). Key hydraulic traits control the dynamics of plant dehydration in four contrasting tree species during drought. Tree Physiology, 43(10), 1772 1783. https://doi.org/10.1093/treephys/tpad075

Brockerhoff, E. G., & Liebhold, A. M. (2017). Ecology of forest insect invasions. Biological Invasions, 19(11), 3141 3159. https://doi.org/10.1007/s10530-017-1514-1

Carol-Aristizabal, M., Dupras, J., Messier, C., & Sousa-Silva, R. (2024). Which Tree Species Best Withstand Urban Stressors? Ask the Experts. Arboriculture & Urban Forestry (AUF), 50(1), 57 75. https://doi.org/10.48044/jauf.2023.026

Castel-Clavera, J., Pimont, F., Opitz, T., Ruffault, J., Rivière, M., & Dupuy, J.-L. (2023). Disentangling the factors of spatio-temporal patterns of wildfire activity in south-eastern France. International Journal of Wildland Fire, 32(1), 15 28. https://doi.org/10.1071/WF22086

Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. Ecology Letters, 12(4), 351 366. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x

Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., & Medlyn, B. E. (2018). Triggers of tree mortality under drought. Nature, 558(7711), 531 539. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0240-x

Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S. J., Feild, T. S., Gleason, S. M., Hacke, U. G., Jacobsen, A. L., Lens, F., Maherali, H., Martínez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P. J., Nardini, A., Pittermann, J., … Zanne, A. E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. Nature, 491(7426), 752 755. https://doi.org/10.1038/nature11688

Cochard, H. (2021). A new mechanism for tree mortality due to drought and heatwaves. Peer Community Journal, 1, e36. https://doi.org/10.24072/pcjournal.45

Cochard, H., Badel, E., Herbette, S., Delzon, S., Choat, B., & Jansen, S. (2013). Methods for measuring plant vulnerability to cavitation : A critical review. Journal of Experimental Botany, 64(15), 4779 4791. https://doi.org/10.1093/jxb/ert193

Courbet, F., Doussan, C., Limousin, J.-M., Martin-StPaul, N., & Simioni, G. (2022). Forêts et changement climatique—Comprendre et modéliser le fonctionnement hydrique des arbres. Éditions Quae. https://www.quae.com/produit/1724/9782759234585/forets-et-changement-climatique

Curt, T., & Frejaville, T. (2018). Wildfire Policy in Mediterranean France: How Far is it Efficient and Sustainable? Risk Analysis, 38(3), 472 488. https://doi.org/10.1111/risa.12855

Dale, A. G., & Frank, S. D. (2017). Warming and drought combine to increase pest insect fitness on urban trees. PLOS ONE, 12(3), e0173844. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173844

Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2001). Climate Change and Forest Disturbances. BioScience, 51(9), 723 734. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0723:CCAFD]2.0.CO;2

Daly, C., Widrlechner, M. P., Halbleib, M. D., Smith, J. I., & Gibson, W. P. (2012). Development of a New USDA Plant Hardiness Zone Map for the United States. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51(2), 242 264. https://doi.org/10.1175/2010JAMC2536.1

Delzon, S., & Cochard, H. (2014). Recent advances in tree hydraulics highlight the ecological significance of the hydraulic safety margin. New Phytologist, 203(2), 355 358. https://doi.org/10.1111/nph.12798

Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H. C., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., Reu, B., Kleyer, M., Wirth, C., Colin Prentice, I., Garnier, E., Bönisch, G., Westoby, M., Poorter, H., Reich, P. B., Moles, A. T., Dickie, J., Gillison, A. N., Zanne, A. E., … Gorné, L. D. (2016). The global spectrum of plant form and function. Nature, 529(7585), Article 7585. https://doi.org/10.1038/nature16489

Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H. C., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., Reu, B., Kleyer, M., Wirth, C., Prentice, I. C., Garnier, E., Bönisch, G., Westoby, M., Poorter, H., Reich, P. B., Moles, A. T., Dickie, J., Zanne, A. E., Chave, J., … Zotz, G. (2022). The global spectrum of plant form and function: Enhanced species-level trait dataset. Scientific Data, 9(1), 755. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01774-9

Drake, J. E., Tjoelker, M. G., Vårhammar, A., Medlyn, B. E., Reich, P. B., Leigh, A., Pfautsch, S., Blackman, C. J., López, R., Aspinwall, M. J., Crous, K. Y., Duursma, R. A., Kumarathunge, D., De Kauwe, M. G., Jiang, M., Nicotra, A. B., Tissue, D. T., Choat, B., Atkin, O. K., & Barton, C. V. M. (2018). Trees tolerate an extreme heatwave via sustained transpirational cooling and increased leaf thermal tolerance. Global Change Biology, 24(6), 2390 2402. https://doi.org/10.1111/gcb.14037

Duputié, A., Rutschmann, A., Ronce, O., & Chuine, I. (2015). Phenological plasticity will not help all species adapt to climate change. Global Change Biology, 21(8), 3062 3073. https://doi.org/10.1111/gcb.12914

Eschen, R., Roques, A., & Santini, A. (2015). Taxonomic dissimilarity in patterns of interception and establishment of alien arthropods, nematodes and pathogens affecting woody plants in Europe. Diversity and Distributions, 21(1), 36 45. https://doi.org/10.1111/ddi.12267

Esperon-Rodriguez, M., Tjoelker, M. G., Lenoir, J., Baumgartner, J. B., Beaumont, L. J., Nipperess, D. A., Power, S. A., Richard, B., Rymer, P. D., & Gallagher, R. V. (2022). Climate change increases global risk to urban forests. Nature Climate Change, 12(10), 950 955. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01465-8

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2 : New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 37(12), 4302 4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Gim, H.-J., Ho, C.-H., Kim, J., & Lee, E. J. (2018). Urbanization may reduce the risk of frost damage to spring flowers: A case study of two shrub species in South Korea. PLOS ONE, 13(2), e0191428. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191428

Glenz, C., Schlaepfer, R., Iorgulescu, I., & Kienast, F. (2006). Flooding tolerance of Central European tree and shrub species. Forest Ecology and Management, 235(1), 1 13. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.065

Griffin-Nolan, R. J., Mohanbabu, N., Araldi-Brondolo, S., Ebert, A. R., LeVonne, J., Lumbsden-Pinto, J. I., Roden, H., Stark, J. R., Tourville, J., Becklin, K. M., Drake, J. E., Frank, D. A., Lamit, L. J., & Fridley, J. D. (2021). Friend or foe? The role of biotic agents in drought-induced plant mortality. Plant Ecology, 222(5), 537 548. https://doi.org/10.1007/s11258-021-01126-4

Guerreiro, S. B., Dawson, R. J., Kilsby, C., Lewis, E., & Ford, A. (2018). Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. Environmental Research Letters, 13(3), 034009. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3

Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. Nature Communications, 13(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2

Hilbert, D., Roman, L., Koeser, A., Vogt, J., & van Doorn, N. (2019). Urban Tree Mortality: A Literature Review. Arboriculture & Urban Forestry, 45(5). https://doi.org/10.48044/jauf.2019.015

Hirons, A. D., Watkins, J. H. R., Baxter, T. J., Miesbauer, J. W., Male-Muñoz, A., Martin, K. W. E., Bassuk, N. L., & Sjöman, H. (2021). Using botanic gardens and arboreta to help identify urban trees for the future. PLANTS, PEOPLE, PLANET, 3(2), 182 193. https://doi.org/10.1002/ppp3.10162

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

Jactel, H., Koricheva, J., & Castagneyrol, B. (2019). Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. Current Opinion in Insect Science, 35, 103 108. https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010

Jactel, H., Moreira, X., & Castagneyrol, B. (2021). Tree Diversity and Forest Resistance to Insect Pests: Patterns, Mechanisms, and Prospects. Annual Review of Entomology, 66(Volume 66, 2021), 277 296. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-041720-075234

Kattge, J., Bönisch, G., Díaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., Tautenhahn, S., Werner, G. D. A., Aakala, T., Abedi, M., Acosta, A. T. R., Adamidis, G. C., Adamson, K., Aiba, M., Albert, C. H., Alcántara, J. M., Alcázar C, C., Aleixo, I., Ali, H., … Wirth, C. (2020). TRY plant trait database – enhanced coverage and open access. Global Change Biology, 26(1), 119 188. https://doi.org/10.1111/gcb.14904

Keppel, G., Craven, D., Weigelt, P., Smith, S. A., van der Sande, M. T., Sandel, B., Levin, S. C., Kreft, H., & Knight, T. M. (2021). Synthesizing tree biodiversity data to understand global patterns and processes of vegetation. Journal of Vegetation Science, 32(3), e13021. https://doi.org/10.1111/jvs.13021

Kim, J., Khouakhi, A., Corstanje, R., & Johnston, A. S. A. (2024). Greater local cooling effects of trees across globally distributed urban green spaces. *Science of The Total Environment*, *911*, 168494. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168494

Kindt, R. (2023). TreeGOER : A database with globally observed environmental ranges for 48,129 tree species. Global Change Biology, 29(22), 6303 6318. https://doi.org/10.1111/gcb.16914

King, C. M., Robinson, J. S., & Cameron, R. W. (2012). Flooding tolerance in four 'Garrigue' landscape plants: Implications for their future use in the urban landscapes of north-west Europe? Landscape and Urban Planning, 107(2), 100 110. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.05.005

Klein, T., Cahanovitc, R., Sprintsin, M., Herr, N., & Schiller, G. (2019). A nation-wide analysis of tree mortality under climate change : Forest loss and its causes in Israel 1948–2017. Forest Ecology and Management, 432, 840 849. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.020

Kreuzwieser, J., & Rennenberg, H. (2014). Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. Plant, Cell & Environment, 37(10), 2245 2259. https://doi.org/10.1111/pce.12310

Kunert, N., Hajek, P., Hietz, P., Morris, H., Rosner, S., & Tholen, D. (2022). Summer temperatures reach the thermal tolerance threshold of photosynthetic decline in temperate conifers. Plant Biology, 24(7), 1254 1261. https://doi.org/10.1111/plb.13349

Lam, O. H. Y., Kattge, J., Tautenhahn, S., Boenisch, G., Kovach, K. R., & Townsend, P. A. (2024). 'rtry': An R package to support plant trait data preprocessing. Ecology and Evolution, 14(5), e11292. https://doi.org/10.1002/ece3.11292

Lamarque, L. J., Corso, D., Torres-Ruiz, J. M., Badel, E., Brodribb, T. J., Burlett, R., Charrier, G., Choat, B., Cochard, H., Gambetta, G. A., Jansen, S., King, A., Lenoir, N., Martin-StPaul, N., Steppe, K., Van den Bulcke, J., Zhang, Y., & Delzon, S. (2018). An inconvenient truth about xylem resistance to embolism in the model species for refilling Laurus nobilis L. Annals of Forest Science, 75(3), 88. https://doi.org/10.1007/s13595-018-0768-9

Leksungnoen, N., Eiadthong, W., & Kjelgren, R. (2017). Thailand's catastrophic flood: Bangkok tree mortality as a function of taxa, habitat, and tree size. Urban Forestry & Urban Greening, 22, 111 119. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.016

Lens, F., Picon-Cochard, C., Delmas, C. E. L., Signarbieux, C., Buttler, A., Cochard, H., Jansen, S., Chauvin, T., Doria, L. C., del Arco, M., & Delzon, S. (2016). Herbaceous Angiosperms Are Not More Vulnerable to Drought-Induced Embolism Than Angiosperm Trees. Plant Physiology, 172(2), 661 667. https://doi.org/10.1104/pp.16.00829

Leon-Garcia, I. V., & Lasso, E. (2019). High heat tolerance in plants from the Andean highlands: Implications for paramos in a warmer world. PLOS ONE, 14(11), e0224218. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224218

Litvak, E., McCarthy, H. R., & Pataki, D. E. (2012). Transpiration sensitivity of urban trees in a semi-arid climate is constrained by xylem vulnerability to cavitation. Tree Physiology, 32(4), 373 388. https://doi.org/10.1093/treephys/tps015

Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., & Bournet, P. E. (2021). Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. Urban Climate, 37, 100844. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844

McDowell, N. G. (2011). Mechanisms Linking Drought, Hydraulics, Carbon Metabolism, and Vegetation Mortality. Plant Physiology, 155(3), 1051 1059. https://doi.org/10.1104/pp.110.170704

Meier, E. (2007). Wood Filter | The Wood Database. https://www.wood-database.com/wood-filter/

Meinzer, F. C., Johnson, D. M., Lachenbruch, B., McCulloh, K. A., & Woodruff, D. R. (2009). Xylem hydraulic safety margins in woody plants : Coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. Functional Ecology, 23(5), 922 930. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01577.x

Michalet, R., Carcaillet, C., Delerue, F., Domec, J.-C., & Lenoir, J. (2024). Assisted migration in a warmer and drier climate: Less climate buffering capacity, less facilitation and more fires at temperate latitudes? Oikos, n/a(n/a), e10248. https://doi.org/10.1111/oik.10248

Niinemets, U. L., & Valladares, F. (2006). Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. Ecological Monographs, 76(4).

Park, D. S., Xie, Y., Ellison, A. M., Lyra, G. M., & Davis, C. C. (2023). Complex climate-mediated effects of urbanization on plant reproductive phenology and frost risk. New Phytologist, 239(6), 2153 2165. https://doi.org/10.1111/nph.18893

Park, I. W., Ramirez-Parada, T., & Mazer, S. J. (2021). Advancing frost dates have reduced frost risk among most North American angiosperms since 1980. Global Change Biology, 27(1), 165 176. https://doi.org/10.1111/gcb.15380

Percival, G. C. (2023). Heat tolerance of urban trees – A review. Urban Forestry & Urban Greening, 86, 128021. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128021

Petruzzellis, F., Tordoni, E., Di Bonaventura, A., Tomasella, M., Natale, S., Panepinto, F., Bacaro, G., & Nardini, A. (2022). Turgor loss point and vulnerability to xylem embolism predict species-specific risk of drought-induced decline of urban trees. Plant Biology, 24(7), 1198 1207. https://doi.org/10.1111/plb.13355

Pimont, F., Ruffault, J., Martin-StPaul, N. K., Dupuy, J.-L., Pimont, F., Ruffault, J., Martin-StPaul, N. K., & Dupuy, J.-L. (2019). Why is the effect of live fuel moisture content on fire rate of spread underestimated in field experiments in shrublands? International Journal of Wildland Fire, 28(2), 127 137. https://doi.org/10.1071/WF18091

Popović, Z., Bojović, S., Marković, M., & Cerdà, A. (2021). Tree species flammability based on plant traits : A synthesis. Facteur, 800, 149625. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149625

Rahman, M. A., Arndt, S., Bravo, F., Cheung, P. K., van Doorn, N., Franceschi, E., del Río, M., Livesley, S. J., Moser-Reischl, A., Pattnaik, N., Rötzer, T., Paeth, H., Pauleit, S., Preisler, Y., Pretzsch, H., Tan, P. Y., Cohen, S., Szota, C., & Torquato, P. R. (2024). More than a canopy cover metric : Influence of canopy quality, water-use strategies and site climate on urban forest cooling potential. Landscape and Urban Planning, 248, 105089. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105089

Rahman, M. A., Stratopoulos, L. M. F., Moser-Reischl, A., Zölch, T., Häberle, K.-H., Rötzer, T., Pretzsch, H., & Pauleit, S. (2020). Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. Building and Environment, 170, 106606. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606

Raupp, M. J., Shrewsbury, P. M., & Herms, D. A. (2010). Ecology of Herbivorous Arthropods in Urban Landscapes. Annual Review of Entomology, 55(Volume 55, 2010), 19 38. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-112408-085351

Rubel, F., & Kottek, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. Meteorologische Zeitschrift, 135 141. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430

Ruffault, J., Limousin, J.-M., Pimont, F., Dupuy, J.-L., De Càceres, M., Cochard, H., Mouillot, F., Blackman, C. J., Torres-Ruiz, J. M., Parsons, R. A., Moreno, M., Delzon, S., Jansen, S., Olioso, A., Choat, B., & Martin-StPaul, N. (2022). Plant hydraulic modelling of leaf and canopy fuel moisture content reveals increasing vulnerability of a Mediterranean forest to wildfires under extreme drought. New Phytologist, 237(4), 1256 1269. https://doi.org/10.1111/nph.18614

Schuster, A.-C., Burghardt, M., & Riederer, M. (2017). The ecophysiology of leaf cuticular transpiration: Are cuticular water permeabilities adapted to ecological conditions? Journal of Experimental Botany, 68(19), 5271 5279. https://doi.org/10.1093/jxb/erx321

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A., & Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. Nature Climate Change, 7(6), 395 402. https://doi.org/10.1038/nclimate3303

Senf, C., Pflugmacher, D., Zhiqiang, Y., Sebald, J., Knorn, J., Neumann, M., Hostert, P., & Seidl, R. (2018). Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades. Nature Communications, 9(1), 4978. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07539-6

Senf, C., & Seidl, R. (2021). Mapping the forest disturbance regimes of Europe. Nature Sustainability, 4(1), 63 70. https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y

Sharmin, M., Tjoelker, M. G., Pfautsch, S., Esperón-Rodriguez, M., Rymer, P. D., & Power, S. A. (2023). Tree Traits and Microclimatic Conditions Determine Cooling Benefits of Urban Trees. Atmosphere, 14(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/atmos14030606

Shashua-Bar, L., Rahman, M. A., Moser-Reischl, A., Peeters, A., Franceschi, E., Pretzsch, H., Rötzer, T., Pauleit, S., Winters, G., Groner, E., & Cohen, S. (2023). Do urban tree hydraulics limit their transpirational cooling? A comparison between temperate and hot arid climates. Urban Climate, 49, 101554. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101554

Sjöman, H., & Anderson, A. (2023). The Essential Tree Selection Guide: For Climate Resilience, Carbon Storage, Species Diversity and Other Ecosystem Benefits. Filbert Press.

Sjöman, H., Hirons, A. D., & Bassuk, N. L. (2015). Urban forest resilience through tree selection—Variation in drought tolerance in Acer. Urban Forestry & Urban Greening, 14(4), 858 865. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.004

Sjöman, H., Hirons, A. D., & Bassuk, N. L. (2018a). Improving confidence in tree species selection for challenging urban sites: A role for leaf turgor loss. Urban Ecosystems, 21(6), 1171 1188. https://doi.org/10.1007/s11252-018-0791-5

Sjöman, H., Hirons, A. D., & Bassuk, N. L. (2018b). Magnolias as urban trees – a preliminary evaluation of drought tolerance in seven magnolia species. Arboricultural Journal, 40(1), 47 56. https://doi.org/10.1080/03071375.2017.1415554

Smith, I. A., Dearborn, V. K., & Hutyra, L. R. (2019). Live fast, die young: Accelerated growth, mortality, and turnover in street trees. PLOS ONE, 14(5), e0215846. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215846

Smithers, R. J., Doick, K. J., Burton, A., Sibille, R., Steinbach, D., Harris, R., Groves, L., & Blicharska, M. (2018). Comparing the relative abilities of tree species to cool the urban environment. Urban Ecosystems, 21(5), 851 862. https://doi.org/10.1007/s11252-018-0761-y

Sorek, Y., Greenstein, S., & Hochberg, U. (2022). Seasonal adjustment of leaf embolism resistance and its importance for hydraulic safety in deciduous trees. Physiologia Plantarum, 174(5), e13785. https://doi.org/10.1111/ppl.13785

Thierry, J., Herpin, S., Levi, R., Canonne, D., Demotes-Mainard, S., Cannavo, P., Lemesle, D., Brialix, L., Rodriguez, F., & Bournet, P. E. (2024). Impact of a water restriction on the summer climatic benefits of trees inside an outdoor street canyon scale model. Building and Environment, 261, 111722. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111722

Thom, D., & Seidl, R. (2016). Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. Biological Reviews, 91(3), 760 781. https://doi.org/10.1111/brv.12193

Tordoni, E., Petruzzellis, F., Di Bonaventura, A., Pavanetto, N., Tomasella, M., Nardini, A., Boscutti, F., Martini, F., & Bacaro, G. (2022). Projections of leaf turgor loss point shifts under future climate change scenarios. Global Change Biology, 28(22), 6640 6652. https://doi.org/10.1111/gcb.16400

Torres-Ruiz, J. M., Cochard, H., Delzon, S., Boivin, T., Burlett, R., Cailleret, M., Corso, D., Delmas, C. E. L., De Caceres, M., Diaz-Espejo, A., Fernández-Conradi, P., Guillemot, J., Lamarque, L. J., Limousin, J.-M., Mantova, M., Mencuccini, M., Morin, X., Pimont, F., De Dios, V. R., … Martin-StPaul, N. K. (2024). Plant hydraulics at the heart of plant, crops and ecosystem functions in the face of climate change. New Phytologist, 241(3), 984 999. https://doi.org/10.1111/nph.19463

Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. Agricultural and Forest Meteorology, 248, 60 69. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005

Wang, H., Harrison, S. P., Li, M., Prentice, I. C., Qiao, S., Wang, R., Xu, H., Mengoli, G., Peng, Y., & Yang, Y. (2022). The China plant trait database version 2. Scientific Data, 9(1), 769. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01884-4

Watkins, H., Hirons, A., Sjöman, H., Cameron, R., & Hitchmough, J. D. (2021). Can Trait-Based Schemes Be Used to Select Species in Urban Forestry? Frontiers in Sustainable Cities, 3. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsc.2021.654618

Wessely, J., Essl, F., Fiedler, K., Gattringer, A., Hülber, B., Ignateva, O., Moser, D., Rammer, W., Dullinger, S., & Seidl, R. (2024). A climate-induced tree species bottleneck for forest management in Europe. Nature Ecology & Evolution, 8(6), 1109 1117. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02406-8

White, R. H., & Zipperer, W. C. (2010). Testing and classification of individual plants for fire behaviour: Plant selection for the wildland–urban interface. International Journal of Wildland Fire, 19(2), 213 227. https://doi.org/10.1071/WF07128

Wilson, P. J., Thompson, K., & Hodgson, J. G. (1999). Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *The New Phytologist*, *143*(1), 155-162. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00427.x

Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., Miller, R. B., Swenson, N. G., Wiemann, M. C., & Chave, J. (2009). Global Wood Density Database. Dryad (http://hdl.handle.net/10255/dryad.235) [Jeu de données].

Zanne, A. E., Tank, D. C., Cornwell, W. K., Eastman, J. M., Smith, S. A., FitzJohn, R. G., McGlinn, D. J., O'Meara, B. C., Moles, A. T., Reich, P. B., Royer, D. L., Soltis, D. E., Stevens, P. F., Westoby, M., Wright, I. J., Aarssen, L., Bertin, R. I., Calaminus, A., Govaerts, R., … Beaulieu, J. M. (2014). Three keys to the radiation of angiosperms into freezing environments. Nature, 506(7486), 89 92. https://doi.org/10.1038/nature12872

Zanne, A. E., Westoby, M., Falster, D. S., Ackerly, D. D., Loarie, S. R., Arnold, S. E. J., & Coomes, D. A. (2010). Angiosperm wood structure : Global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. American Journal of Botany, 97(2), 207 215. https://doi.org/10.3732/ajb.0900178

Zuleta, D., Arellano, G., Muller-Landau, H. C., McMahon, S. M., Aguilar, S., Bunyavejchewin, S., Cárdenas, D., Chang-Yang, C.-H., Duque, A., Mitre, D., Nasardin, M., Pérez, R., Sun, I.-F., Yao, T. L., & Davies, S. J. (2022). Individual tree damage dominates mortality risk factors across six tropical forests. New Phytologist, 233(2), 705 721. https://doi.org/10.1111/nph.17832

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif des sources constitutives du périmètre taxonomique 12

Tableau 2 : Récapitulatif du contenu des deux principales bases de données mobilisées dans le projet AVEC 16

Tableau 3 : Règles pour l'établissement de l'indice de confiance 23

Tableau 4 : Commentaires accompagnant l'indicateur « potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches », en fonction de l'indice de confiance 23

Tableau 5 : Définition des critères Grandeur, Longévité et Densité du bois 25

Tableau 6 : Assemblage des critères Grandeur, Longévité et Densité du bois pour composer le Potentiel de séquestration carbone 26

Tableau 7 : Périmètres taxonomiques investigués dans le projet AVEC 27

Tableau 8 : Critères et indicateurs produits dans le cadre du programme AVEC 29

Tableau 9 : Bilan des données renseignées par taxons en fonction des critères et indicateurs 29

Tableau 10 : Bilan des données renseignées par nature taxonomique et types de plante sur les indicateurs et critères liés au comportement en conditions chaudes et sèches et au potentiel de rafraîchissement 30

Tableau 11 : Pistes pour l'acquisition de nouvelles données sur les critères investigués dans le cadre du programme AVEC 35

FIGURES

Figure 1 : Évolutions des zones climatiques en Europe entre les périodes 1995-2014 et 2076-2100. Les motifs blancs correspondent aux hotspots de biodiversité. GIEC (2022) d'après Rubel & Kottek (2010). ..9

Figure 2 : Processus de traitement des données issues de TreeGOER. 17

Figure 3 : Processus de traitement des données issues de TRY 18

Figure 4 : Exemple de courbe de vulnérabilité à l'embolie....18

Figure 5 : Cheminement pour la construction de la base de données des P_{50}. 19

Figure 6 : Cheminement pour la construction de la base de données des TLP (point de perte de turgescence)....19

Figure 7 : Grille d'attribution de l'indice « niche climatique », en fonction de la position d'un taxon sur le plan croisant les paramètres climatiques retenus. Les seuils des intervalles de température et de cumul de précipitation retenus sont indiqués respectivement en abscisse et en ordonnée du graphique.....21

Figure 8 : Schéma de construction de l'indicateur « potentiel de résistance climatique en conditions chaudes et sèches » 22

Figure 9 : Schéma de construction des indicateurs « Potentiel d'ombrage » et « Potentiel de transpiration estivale ». 25

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols… - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE
L'**ADEME**

FAITS ET CHIFFRES
L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR
L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

ILS L'ONT FAIT
L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES
L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard

HORIZONS
L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

EXPERTISES

AVEC : adaptation du végétal au climat de demain

Planter des arbres constitue l'une des solutions les plus efficaces pour rafraichir les villes et villages. Cela est cependant soumis à conditions, car les arbres ne présentent pas tous le même pouvoir rafraichissant, ni la même capacité d'adaptation aux contraintes urbaines. Selon une étude publiée dans Nature Climate Change, d'ici 2050, le changement climatique et le manque d'eau condamnent plus des deux tiers des essences d'arbres actuellement plantées dans les villes. Environ 60% sont déjà en souffrance. La végétalisation urbaine se heurte à de nombreux obstacles : la pollution des sols et de l'air, la pression foncière, le besoin d'eau et de lumière, le risque de développement d'allergies liées au pollen, le manque d'espaces perméables…

Dans ce contexte, il est essentiel de connaître les capacités de rafraichissement et d'adaptation des végétaux pour le choix des essences à l'aune des effets du changement climatique.

Plante & Cité, l'ADEME et le Cerema se sont donc associés pour mener le projet AVEC : « Adaptation du végétal au climat de demain » afin d'étudier les caractéristiques des arbres, arbustes et plantes grimpantes, sur :

Le potentiel de rafraichissement des essences, via l'ombre et l'évapotranspiration.

Leur capacité à supporter le climat de demain, notamment les conditions chaudes et sèches.

Grâce à l'analyse de bases internationales sur les

Quels arbres pour demain ?

Le projet AVEC a permis de renseigner un potentiel de ***résistance climatique*** *en conditions chaudes et sèches, un potentiel de* ***rafraîchissement*** *et un potentiel de* ***séquestration carbone****, pour plusieurs centaines d'espèces d'arbres, arbustes et grimpantes employées pour la végétalisation des villes.*

Les résultats sont accessibles pour tous, sur ***Floriscope.io****.*

Crédits photos : Shutterstock