



HAL
open science

Caractériser l'enveloppe climatique future des jardins communs forestiers : une approche essentielle pour mieux raisonner l'adaptation des essences

Gaspard Rihm, Bruno Fady

► To cite this version:

Gaspard Rihm, Bruno Fady. Caractériser l'enveloppe climatique future des jardins communs forestiers : une approche essentielle pour mieux raisonner l'adaptation des essences. *Revue forestière française*, 2023, 74 (4), pp.495-506. 10.20870/revforfr.2023.7900 . hal-04343910

HAL Id: hal-04343910

<https://hal.science/hal-04343910>

Submitted on 20 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Caractériser l'enveloppe climatique future des jardins communs forestiers : une approche essentielle pour mieux raisonner l'adaptation des espèces

Gaspard Rihm¹, Bruno Fady^{1*}

1. INRAE, Unité de recherche « Écologie des Forêts Méditerranéennes », URFM, 84914, Avignon, France

*Auteur correspondant : bruno.fady@inrae.fr

ORCID : 0000-0003-2379-7617

Caractériser l'enveloppe climatique future des jardins communs forestiers : une approche essentielle pour mieux raisonner l'adaptation des espèces

L'adaptation au changement climatique est un enjeu de gestion majeur pour les forêts françaises. Pour décrire et comprendre la variabilité génétique et la plasticité phénotypique des caractères d'intérêt pour l'adaptation, les jardins communs (dont les tests de provenances) sont un outil de choix. Nous décrivons dans ce travail un des réseaux forestiers français majeur de tests en jardins communs (GEN4X), son amplitude écologique et, *via* une approche de modélisation de niche, sa sensibilité à un climat qui va en se réchauffant et s'asséchant au cours du siècle. Une attention particulière a été portée aux dispositifs situés en région méditerranéenne.

Characterising the future climate envelope of common forest gardens: a key approach to better rationalise species adaptation

Adaptation to climate change is a major management stake for French forests. Common gardens (including provenance tests) are choice tools to describe and understand the genetic variability and phenotypic plasticity of traits of interest for adaptation. The present work describes i) one of the major forest networks dedicated to common garden tests in France (GEN4X), its ecological range, and ii) through a niche modelling approach, its sensitivity to climate, which is going to grow warmer and drier in the course of the century. Special attention was paid to the devices located in the Mediterranean region.

Messages clés :

- Les jardins communs sont des outils pour tester l'adaptation des essences au climat futur.
- Les conditions climatiques actuelles et futures dans ces jardins ont été évaluées.
- La zone méditerranéenne préfigure les conditions du futur dans une grande partie de la France.

Mots clés : niche climatique, test de provenances, adaptation génétique, plasticité phénotypique

Highlights:

- Common gardens are tools for testing species adaptation to future climate
- Current and future climate conditions in these gardens have been assessed
- The Mediterranean region prefigures future conditions in a large part of France

Keywords: Climate niche, provenance test, genetic adaptation, phenotypic plasticity

Citation de l'article : Rihm, G., & Fady, B. (2023). Caractériser l'enveloppe climatique future des jardins communs forestiers : une approche essentielle pour mieux raisonner l'adaptation des essences. *Revue forestière française*, 74(4), 495-506. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2023.7900>



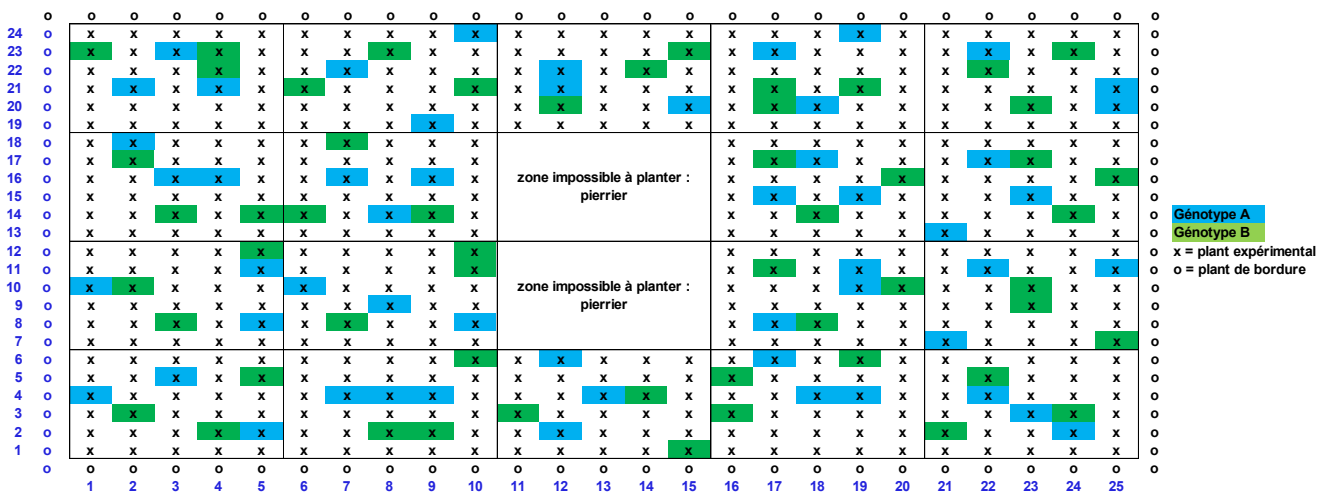
Licence Creative Commons
Attribution - 4.0 International (CC BY 4.0)

Les forêts sont un des habitats les plus diversifiés et les plus riches en espèces au monde (Myers *et al.*, 2000). Elles fournissent de multiples services écosystémiques tels que la régulation du climat et du cycle de l'eau, le contrôle de l'érosion et la production de biomasse (Thompson *et al.*, 2011). Ces services sont et devraient être largement et négativement impactés par le changement climatique global (Thom & Seidl, 2016). L'augmentation des températures à la surface du globe devrait significativement affecter la productivité et la pérennité des peuplements forestiers *via* l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des feux de forêts, des pullulations d'insectes et de pathogènes et des sécheresses, notamment (Choat *et al.*, 2012 ; Seidl *et al.*, 2017 ; Gallagher *et al.*, 2019 ; Coop *et al.*, 2020 ; Forzieri *et al.*, 2021).

Ces conséquences indirectes du changement climatique global affecteront la survie des arbres qui ne manquent cependant pas d'atouts pour réagir, notamment si les changements ne dépassent pas ceux sur lesquels les Nations unies se sont entendus dans le cadre des accords de Paris sur le climat en 2015 (<https://unfccc.int/fr/processus-et-reunions/l-accord-de-paris/l-accord-de-paris>). Ces atouts sont en particulier leur capacité à modifier leur physiologie lorsque l'environnement change (plasticité phénotypique) et leur capacité à produire une descendance abondante et souvent fréquente dont les caractéristiques phénotypiques pourront évoluer vers un nouvel optimum dans de nouvelles conditions environnementales sous l'effet de la sélection naturelle (adaptation génétique). Plasticité phénotypique et adaptation génétique procurent un potentiel d'adaptation non négligeable aux arbres forestiers face à des changements rapides (Aitken *et al.*, 2008 ; Alberto *et al.*, 2013).

Un bon outil expérimental pour étudier la réponse à la sélection de populations différentes est le test en « jardins communs ». Cet outil consiste à installer dans un environnement commun des individus issus d'origines génétiques diverses (par exemple des origines géographiques différentes, les provenances, ou des familles différentes issues d'un même peuplement forestier), collectivement appelées « génotype ». Du fait de cet environnement commun, qui peut être décrit plus ou moins finement par la constitution de blocs, les différences phénotypiques mesurées entre génotypes différents dans un jardin commun pourront être attribuées à de la variabilité génétique (figure 1, ci-dessous). Les différences observées chez un même génotype planté dans des jardins communs différents relèveront de la plasticité phénotypique, avec adaptation locale si les génotypes locaux ont systématiquement une meilleure performance dans leur environnement d'origine que les autres génotypes (Kawecki & Ebert, 2004 ; Lefèvre *et al.*, 2015 ; De Villemerueil, 2016).

Figure 1 | Représentation schématique d'un jardin commun (en blocs complet à composition aléatoire) Chaque génotype est présent dans chaque bloc et est répété 54 fois dans le dispositif (10 génotypes, 18 blocs, 3 individus par génotype et par bloc). Une partie de la zone a été simulée comme non plantable. Le dispositif est entouré de plants « de bordure », isolant le dispositif du milieu environnant et supprimant les effets de bordure pour les plants expérimentaux. Chaque individu est identifiable par sa position géographique (chiffres en bleu). La position de deux génotypes (bleu et vert) est donnée à titre d'exemple.



On trouve les premières traces des jardins communs dès le XVIII^e siècle. Le botaniste et inspecteur-général de la Marine française, Duhamel du Monceau, imagine alors les premiers tests de provenances de *Pinus sylvestris*, dans l'optique d'augmenter les stocks de bois pour la construction de navires (Langlet, 1971). C'est dans les années 1820 que les tests de provenances sont réellement étudiés grâce à Vilmorin, qui reprend les questionnements de Duhamel du Monceau, mais cette fois-ci publie les résultats en 1862. S'ensuit un intérêt croissant pour les tests de provenances, bien représenté dans l'Union internationale des Instituts de Recherches forestières (International Union of Forest Research Organizations, IUFRO) dès sa création en 1892 (Matyas, 1996). Parmi les objectifs premiers de l'IUFRO, on retrouve l'initiation et la coordination de tests de provenances internationaux. Ce sont les débuts de ce que l'on appelle la « génécologie », qui donnera ensuite lieu à de plus en plus d'études sur les liens entre provenances, lignées évolutives, climats, sols, phénotypes, dans une optique d'amélioration et d'augmentation de la ressource forestière disponible pour la plantation, mais aussi de connaissance fondamentale, dont l'adaptation sous l'effet de la sélection naturelle.

Ainsi, les jardins communs sont des dispositifs anciennement utilisés, mais qui restent, aujourd'hui encore, à l'heure de la génomique, et malgré les coûts financiers certains qu'ils engendrent, des outils de choix indispensables pour caractériser la diversité génétique et la plasticité phénotypique de caractères d'importance pour l'adaptation locale et globale (Lefèvre *et al.*, 2015 ; Martínez-Sancho *et al.*, 2021).

En France, INRAE gère un réseau très conséquent de jardins communs forestiers, appelé GEN4X, acronyme de « réseau de génétique forestière pour la recherche et l'expérimentation » (<https://www6.inrae.fr/in-sylva-france/Services/In-Situ/Reseau-GEN4X>). Le réseau comprend plus de 2 000 ha de tests pour un total d'environ 2,5 millions d'arbres plantés. Il sert aujourd'hui à l'expérimentation, à l'observation mais aussi à la conservation et l'utilisation de ressources génétiques forestières. De nombreuses mesures sont effectuées dans les dispositifs : croissance (mesures de hauteur, croissance radiale), survie (résistance aux parasites, maladies), phénologie foliaire, fructification, mais aussi des récoltes d'échantillons biologiques indispensables aux analyses de biologie moléculaire (feuilles, graines). Le réseau GEN4X est lié à deux grandes infrastructures de recherche françaises : IN-Sylva France (<https://www6.inrae.fr/in-sylva-france/>) essentiellement, mais aussi RARE (<https://www.agrobrc-rare.org/>) pour sa richesse en géotypes d'intérêt. Le réseau produit un grand nombre de données et métadonnées, gérées dans les unités expérimentales INRAE, supports de très nombreuses publications (<https://www6.inrae.fr/in-sylva-france/Communication/Publications>) et de recommanda-

tions pour l'appui aux politiques publiques comme les fiches conseil pour l'utilisation des matériels forestiers de reboisement (Pierrangelo et Ricodeau, 2017 ; <https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-dutilisation-des-provenances-et-varietes-forestieres>).

Les jardins communs du réseau GEN4X ont été installés dans des conditions climatiques qui ont changé et vont encore rapidement changer au cours des décennies à venir. L'objectif du travail présenté ici est de :

- caractériser l'enveloppe climatique dans lequel les jardins communs se trouvent et vont se retrouver selon deux scénarios climatiques identifiés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ;
- qualifier l'impact de ces changements en termes de représentativité spatiale du réseau GEN4X dans les futurs climats français ;
- et ainsi proposer quelques priorités de recherche et de gestion pour que le réseau français des jardins communs réponde aux enjeux du changement climatique, en faisant un focus particulier sur les jardins communs sous climat méditerranéen.

Cette région française est particulièrement soumise aux contraintes du changement climatique et son climat chaud et sec en été pourrait largement s'étendre vers le nord en France métropolitaine au cours du XXI^e siècle (MedECC, 2020).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

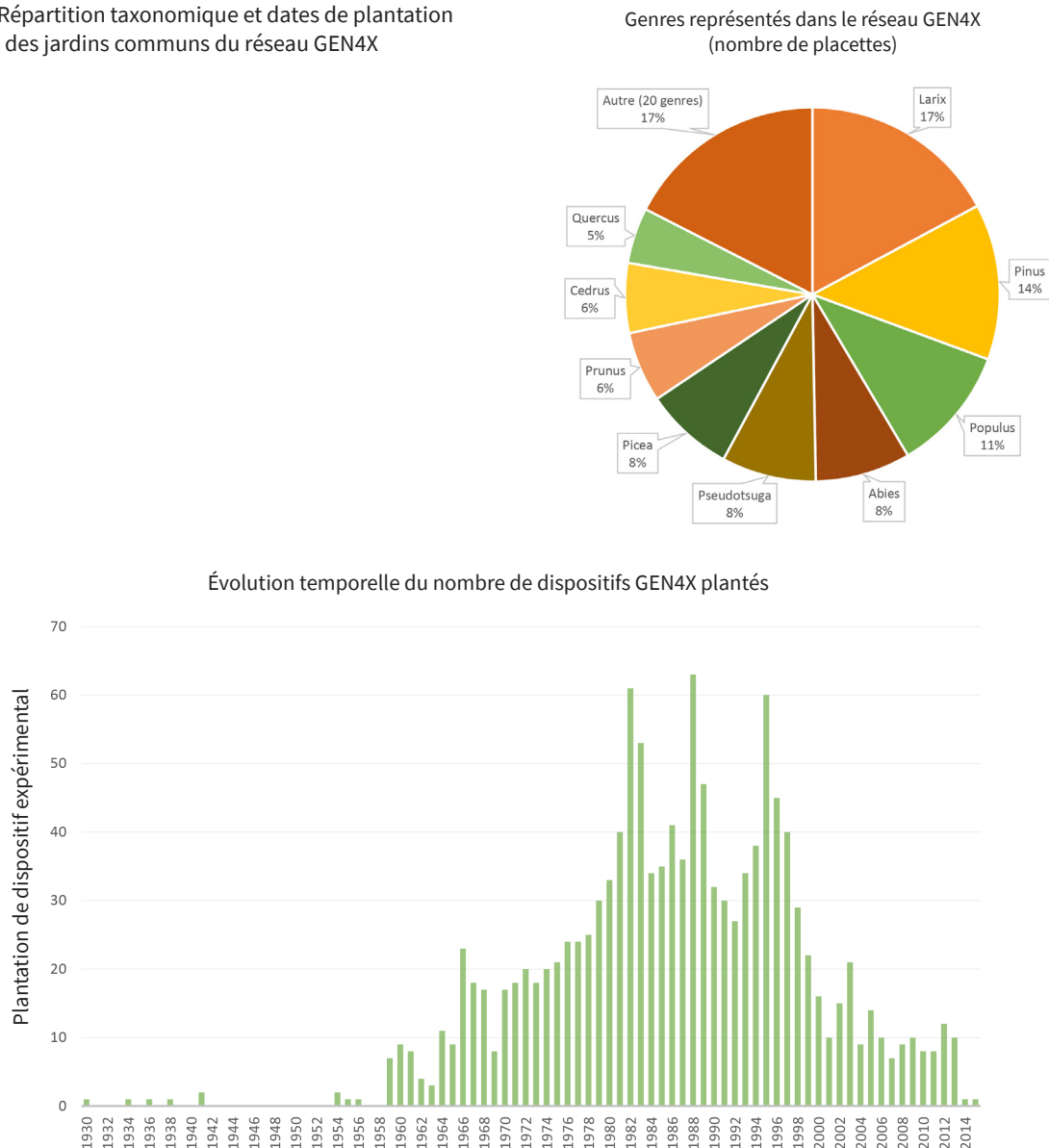
Pour répondre à ces questions, nous avons tout d'abord collecté toute l'information de géolocalisation et de composition taxonomique disponible sur les sites du réseau INRAE de génétique forestière pour la recherche et l'expérimentation (GEN4X, Michotey *et al.*, 2021). Pour caractériser le réseau GEN4X, nous avons identifié dans quelles grande région écologique (GRECO) et sylvoécocorégion (SER) chaque jardin commun était présent (IFN, 2011). Nous avons aussi affecté à chaque jardin commun une série d'indices climatiques simples en utilisant la base de données ClimateEU (Marchi *et al.*, 2020), via son portail web ClimateDT (<https://www.ibbr.cnr.it/climate-dt/>), qui fournit des données climatiques pour l'Europe à une résolution de 1 km, en utilisant des données CRU-TS (Harris *et al.*, 2020), pour la période historique (1901 - actuel) et des données UKCP18 (Lowe *et al.*, 2019) pour les projections futures (jusqu'à 2098). Nous avons ainsi exploré la représentativité du réseau des jardins communs français au sein de la diversité écologique et climatique française pour deux périodes, actuelle (1990-2020) et future (2050-2080), utilisant pour le futur deux scénarios climatiques

du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : RCP2.6 et RCP8.5 (Moss *et al.*, 2008).

Pour évaluer les enjeux futurs en termes de recherche et avec une vision spatialisée, nous avons considéré que l'ensemble des jardins communs du réseau GEN4X occupait une niche climatique, à l'image de ce qui se fait pour les espèces (Thuiller, 2004). Nous avons modélisé la « niche écologique » actuelle des jardins communs en utilisant la plateforme *biomod2* implémentée dans R, et cinq algorithmes différents parmi la dizaine offerte dans *biomod2* : Modèle Linéaire Généralisé (GLM), Modèle Additif Généralisé (GAM), Generalized Boosted Model (GBM), Random Forest (RF) et Maximum d'Entropie (MaxEnt). Notre objectif était de tester une large gamme de modèles utilisant des

données de présence / absence. Deux sont basés sur les régressions statistiques (GLM, GAM), un sur l'assemblage d'arbres décisionnels (RF), un sur une combinaison de régressions et arbres décisionnels (GBM) et le dernier sur l'apprentissage maximisant l'entropie (MaxEnt). Alors que le GLM suit une loi de distribution et est donc assez peu flexible (mais simple d'utilisation), les autres sont plus souples mais souvent trop complexes et cherchent à trop s'adapter aux données d'entraînement. Les modèles basés sur les arbres décisionnels sont robustes au problème de colinéarité entre variables. Les principes, avantages et inconvénients de ces modèles ont été largement discutés dans la littérature scientifique, notamment par Guisan *et al.* (2002), Elith *et al.* (2008), Elith *et al.* (2011) et Pecchi *et al.* (2019). Nous avons utilisé la méthode des True Skill

Figure 2 | Répartition taxonomique et dates de plantation de chacun des jardins communs du réseau GEN4X



Statistics (TSS) comme métrique d'évaluation de la pertinence du modèle choisi (Allouche *et al.*, 2006). Nous avons ainsi identifié les régions dans lesquelles les jardins communs trouveront encore leur niche climatique et là où elle aura disparu à l'horizon 2050-2080. Nous discutons en particulier de l'intérêt des jardins communs de la zone climatique méditerranéenne.

Toutes les analyses de données ont été faites avec les outils et environnements QGIS (<https://www.qgis.org/fr/>) et RStudio (<https://posit.co/download/rstudio-desktop/>). Les précisions supplémentaires sur les méthodes utilisées (algorithmes, paramétrage, validation, tests de performance) sont données dans Rihm (2021).

RÉSULTATS

Description taxonomique et écologique des jardins communs GEN4X

La base de données du réseau GEN4X référence actuellement 1 208 dispositifs en jardin commun répartis sur l'ensemble du territoire français pour lesquels des coordon-

nées géographiques et la composition spécifique existent. En termes de représentativité taxonomique, les 1 208 dispositifs échantillonnent une trentaine de genres et plus de 90 espèces (figure 2, p. 498). L'essentiel des dispositifs a été installé avant l'année 2000, avec un pic notable dans les années 1980-1990. Les types de dispositifs les plus fréquents sont les tests de descendances (39 %) qui comparent des génotypes dont on connaît le degré d'apparement, et les tests de provenances (34 %) qui comparent des descendants d'individus mélangés (dont le degré d'apparement n'est pas connu) issus d'une même forêt d'origine géographique connue. Les tests de comparaison d'espèces (arboretums) sont plus rares (2 %). La surface moyenne des dispositifs est de 2 ha, avec des extrêmes allant de 0,25 à 30,5 ha.

Les dispositifs du réseau GEN4X sont présents dans plus de 80 % des 91 SER métropolitaines françaises (figure 3, ci-dessous). Les SER B70 (Sologne-Orléanais) et C30 (Plaines et dépressions argileuses du Grand Est) sont particulièrement bien représentées, avec 89 dispositifs chacune. Les Grandes Régions Écologiques « Méditerranée » (GRECO J) et « Corse » (GRECO K), caractérisées par un climat méditerranéen au sens de Olson *et al.* (2001), abritent 181 dispositifs, soit un peu moins de 15 % du total.

Figure 3 | Carte de localisation des dispositifs en jardin commun du réseau Gen4X en France métropolitaine et dans les sylvoécotéorégions métropolitaines

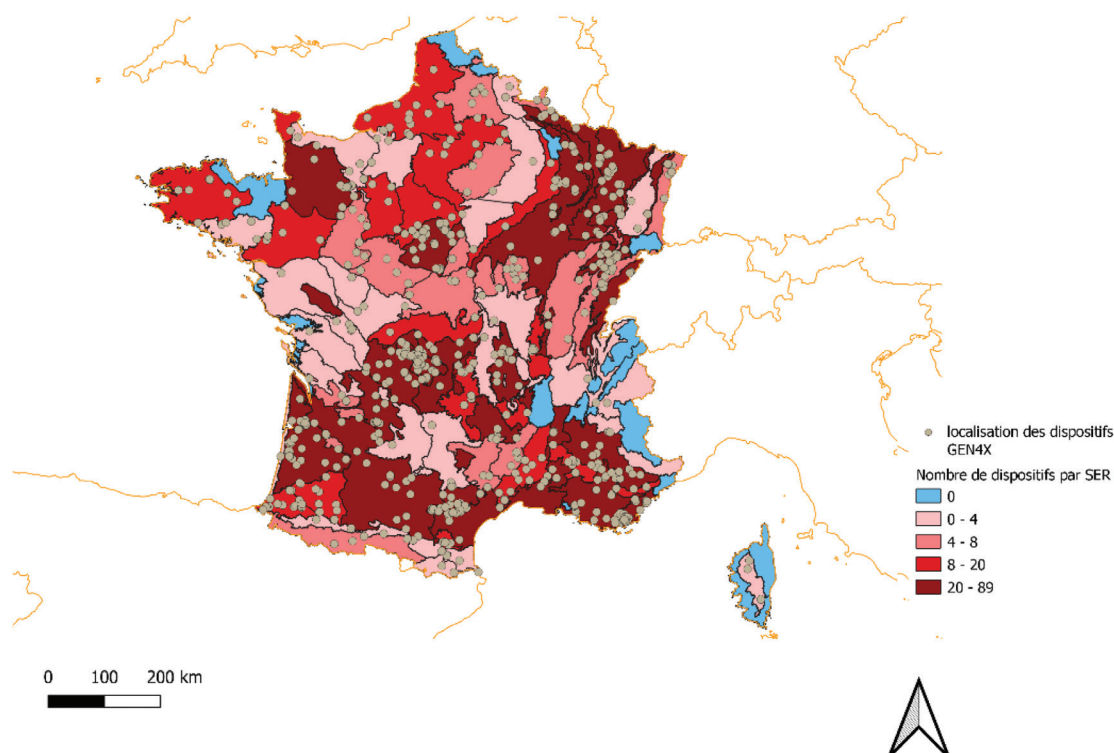
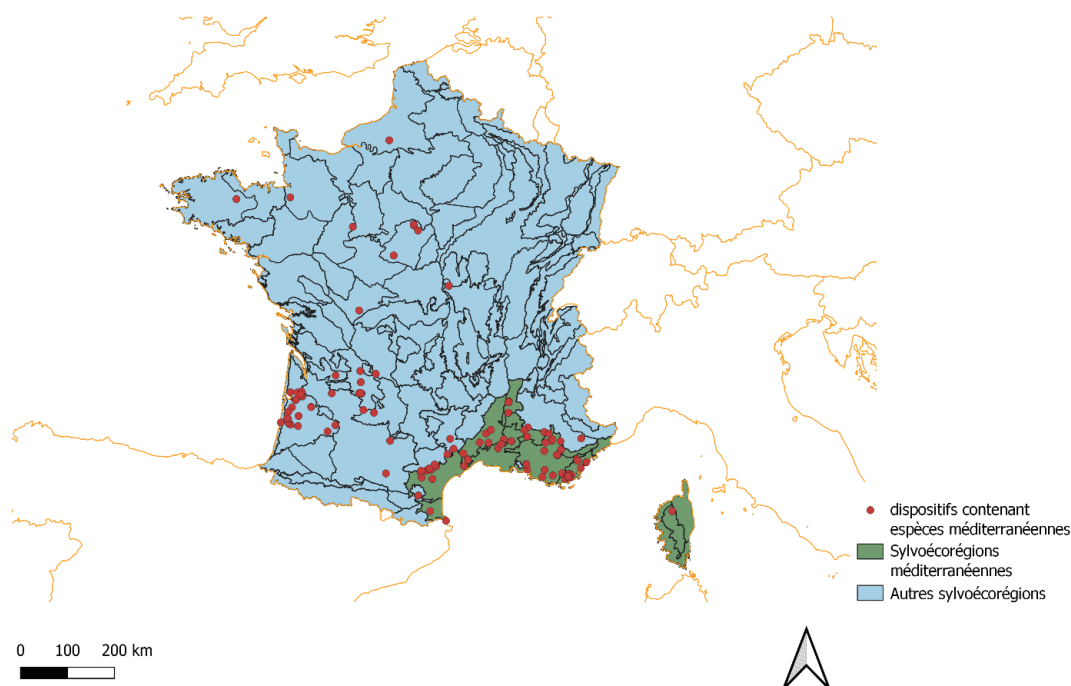


Figure 4 | Carte de localisation des dispositifs en jardin commun du réseau Gen4X en France contenant des espèces d'arbres forestiers méditerranéens



Présence des espèces méditerranéennes dans le réseau des jardins communs GEN4X

Les espèces d'arbres forestiers méditerranéens (au sens de Médail *et al.*, 2019 pour les espèces européennes et dont la majorité de l'aire de répartition est en climat méditerranéen pour les autres) sont présentes dans 15 % des jardins communs GEN4X. Elles sont absentes du Nord-Est et leur présence est essentiellement limitée à la région bioclimatique méditerranéenne (figure 4, ci-dessus).

Représentativité climatique actuelle et future des jardins communs GEN4X

Que ce soit en termes de variables climatiques moyennes, de saisonnalité ou d'extrêmes, le réseau couvre actuellement très bien la variabilité climatique française métropolitaine, à l'exception des régions montagneuses à climat froid (figure 5, p. 501). Par contre, et quel que soit le scénario de changement climatique envisagé, les climats actuels des jardins communs seront en grande majorité absents des climats moyens, de saisonnalité et extrêmes de la seconde moitié du XXI^e siècle. Seuls les climats actuels des jardins communs méditerranéens échantillonnent encore des climats existant dans le futur, sauf pour ce qui est des valeurs extrêmes sous scénario RCP8.5 (figure 5, p. 501).

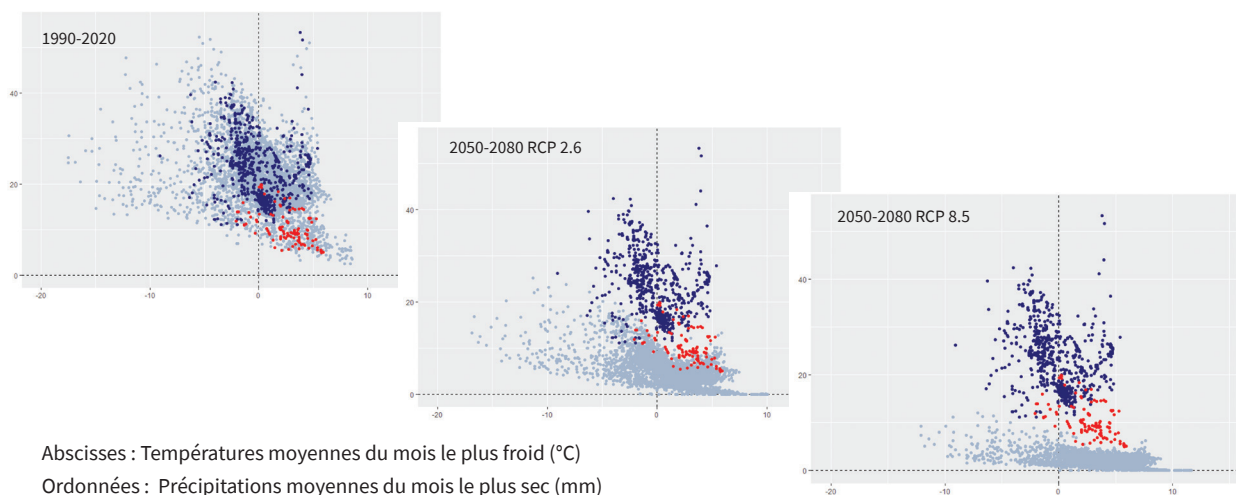
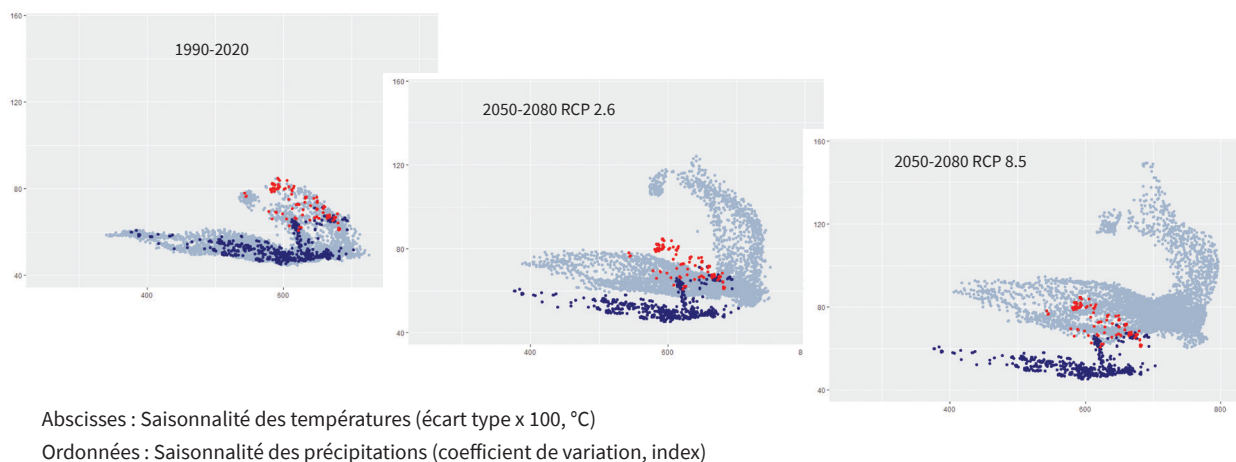
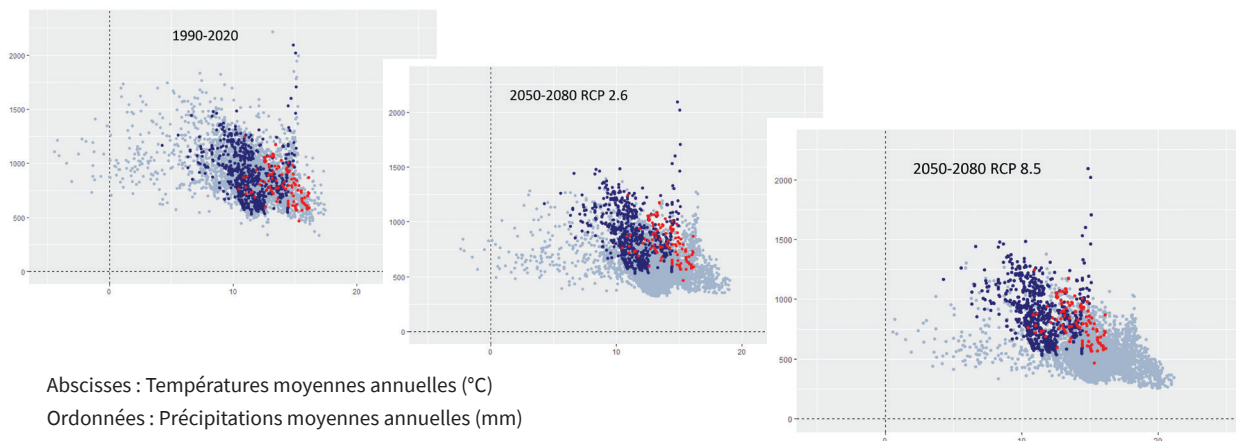
Modélisation de la « niche » climatique actuelle et future des jardins communs GEN4X

Parmi les 19 variables climatiques fournies par ClimateEU, 6 variables non-colinéaires ont été retenues, qui expliquent la majeure partie de la variabilité climatique des jardins communs du réseau GEN4X suite à une analyse en composantes principales : température moyenne annuelle, moyenne mensuelle de l'amplitude des températures diurnes, température maximale du mois le plus chaud, précipitation moyenne annuelle, saisonnalité des précipitations et précipitations cumulées du trimestre le plus chaud.

Le modèle qui permet de décrire le mieux le jeu de données des dispositifs GEN4X en utilisant ces variables climatiques de température et de pluviométrie les plus pertinentes, est la méthode d'apprentissage automatique « Random Forest » (score TSS = 0,630). Ce score étant néanmoins relativement faible (l'adéquation parfaite entre données et modèle étant obtenue pour une valeur TSS = 1), nous avons construit un modèle d'ensemble, une fonctionnalité de *biomod2* permettant de maximiser les performances des algorithmes individuels testés (Hao *et al.*, 2019). Utilisant la méthode des « weighted mean of probabilities », le score TSS du modèle d'ensemble basé sur les cinq algorithmes testés est ainsi passé à 0,728,

Figure 5 | Situation climatique des jardins communs du réseau GEN4X (couleur foncée) dans le climat français métropolitain (couleur claire) pour plusieurs variables de température et précipitation (moyennes, saisonnalité et extrêmes). Les jardins communs en climat méditerranéen apparaissent en rouge foncé et les autres en bleu foncé.

Chaque série de trois graphiques présente de gauche à droite : le climat actuel, le climat de la période 2050-2080 sous le scénario RCP 2.6 et le climat de la période 2050-2080 sous le scénario RCP 8.5. Dans la série supérieure, les trois graphiques présentent en abscisse les températures moyennes annuelles et en ordonnée les précipitations cumulées annuelles. Dans la série du milieu, les trois graphiques présentent en abscisse la saisonnalité des températures moyennes annuelles et en ordonnée la saisonnalité des précipitations annuelles. Dans la série inférieure, les trois graphiques présentent en abscisse la température moyenne du mois le plus froid et en ordonnée les précipitations moyennes du mois le plus sec.



ce qui nous semble une adéquation acceptable du modèle aux données vu la diversité des climats couverts par les jardins communs.

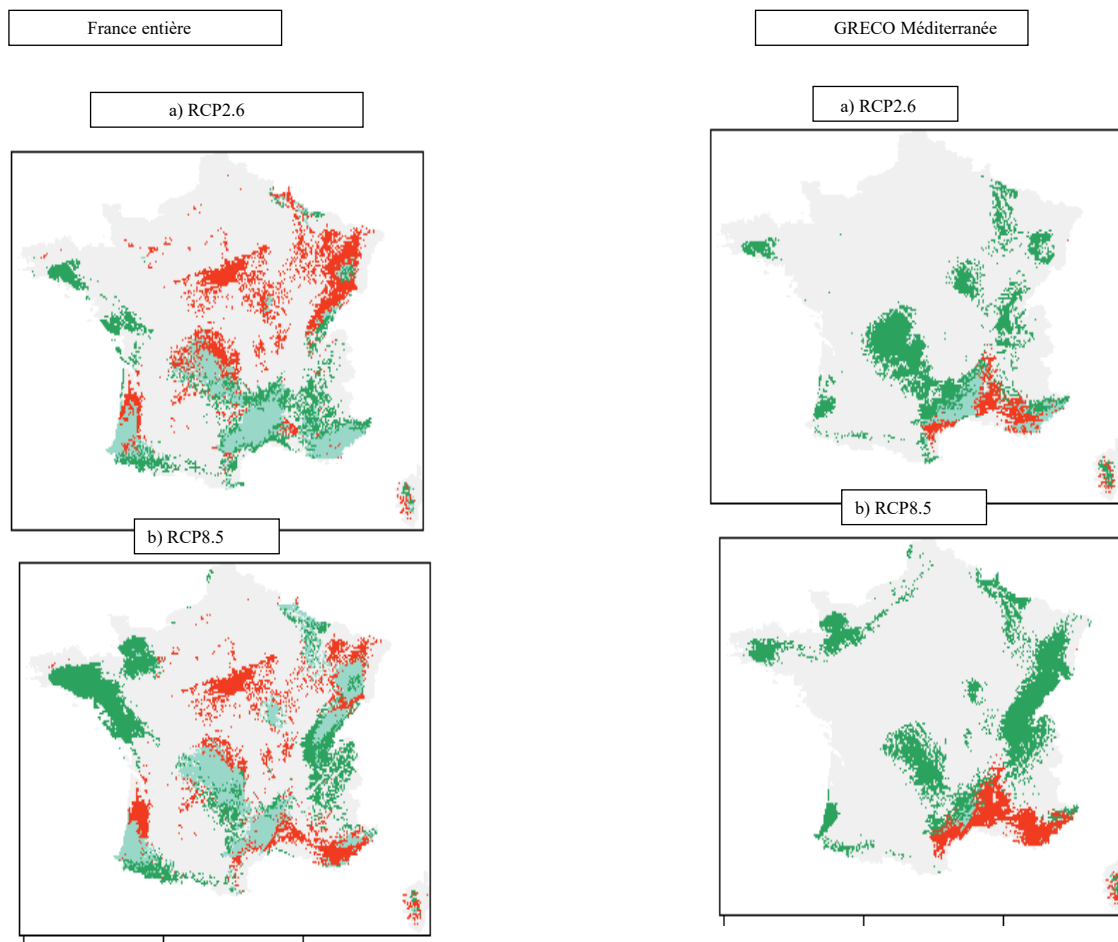
Sous scénario RCP2.6, le modèle d'ensemble indique que la compatibilité climatique entre la niche actuelle et la niche future des jardins communs sera de 25,3 %. Cette valeur devient 24,9 % sous le scénario RCP8.5. Seuls environ 25 % des dispositifs connaîtront un climat existant actuellement au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle. Ces climats compatibles se répartissent de manière non aléatoire sur le territoire (figure 6, ci-dessous). Sous le scénario RCP2.6, les jardins communs actuels des régions Centre, Nord-Est, Limousin et Nord-Aquitaine n'auront, en 2050-2080, plus d'analogue du climat actuel. Sous le scénario RCP8.5, la région méditerranéenne se rajoute aux secteurs précédents (figure 6, zones rouges). Les analogues du climat actuel des jardins communs se retrouveront essentiellement dans les régions Bretagne, Normandie et

en altitude dans les massifs montagneux (figure 6, zones vertes).

En se focalisant sur le jeu de données des jardins communs présents dans les deux GRECO sous climat méditerranéen (179 occurrences utilisables), l'ajustement des données au modèle d'ensemble progresse significativement (TSS = 0,946). Le modèle prédit que 48 % des dispositifs seront encore dans un climat existant actuellement sous le scénario RCP2.6, contre moins de 10 % pour le scénario RCP8.5 (figure 6, ci-dessous). Enfin, en considérant le jeu de données des jardins communs contenant au moins un taxon méditerranéen (soit 178 occurrences), l'ajustement des données au modèle d'ensemble demeure très correct (TSS = 0,846). Le modèle prédit alors que 61 % des dispositifs seront encore dans un climat existant actuellement sous le scénario RCP2.6, contre un peu moins de 30 % pour le scénario RCP8.5.

Figure 6 | Changement d'occupation spatiale de la niche climatique modélisée des jardins communs GEN4X à l'horizon 2050-2080 sous deux scénarios climatiques : RCP2.6 (ligne du haut) et RCP8.5 (ligne du bas) et deux jeux de données : France entière (panneaux de gauche) et GRECO Méditerranée (panneaux de droite)

En gris clair les zones d'absence, en rouge les zones où la niche climatique n'existe plus, en vert clair les zones inchangées et en vert foncé les zones où la niche climatique est nouvelle par rapport à l'époque actuelle (1990-2020).



DISCUSSION ET CONCLUSION

Le jeu de données sur lequel nous avons travaillé ne contient pas tous les jardins communs génétiques présents en France métropolitaine. De nombreux tests INRAE contenant du Pin maritime, du Douglas ou du Peuplier ne sont pas encore archivés dans des bases de données en accès libre. De même, les tests mis en place par le Centre national de la propriété forestière (CNPF) ou l'Office national des forêts (ONF) ne figurent pas dans cette base de données. Néanmoins, le jeu de données sur lequel nous avons travaillé est très conséquent, taxonomiquement et spatialement. Nous pensons que nos conclusions sont robustes même s'il y a bien un enjeu à répertorier *in extenso* et valoriser l'information concernant tous les jardins communs français, par exemple *via* l'infrastructure nationale de recherche IN-Sylva France.

Notre travail est une interprétation de la notion d'enveloppe climatique employée dans les modèles de niche. Les entités de bases comparées ne sont pas des taxons avec des propriétés biologiques identifiées, mais des jardins communs mono- ou multi-spécifiques couvrant une grande diversité de climats. L'exercice ne permet pas de porter un jugement sur les taxons et génotypes appropriés (ce qui demanderait une disponibilité de la documentation sur la composition génétique des jardins communs qui n'est pas facilement disponible à l'heure actuelle), ni sur leur adaptation locale ou leur plasticité phénotypique, ce qui serait bien évidemment d'un grand intérêt dans le cadre de questionnements de gestion actuels engendrés par le changement climatique. Néanmoins, l'exercice per-

met bien de souligner les zones climatiques (et donc les habitats et les régions) à enjeu, pour la collecte de données et pour l'installation de nouveaux dispositifs.

Le réseau des jardins communs de génétique forestière GEN4X est représentatif de la diversité climatique actuelle de la France métropolitaine, à l'exception des régions les plus froides. Sous l'effet des changements climatiques, des bouleversements sont à attendre en termes de représentativité climatique à l'horizon 2050-2080. L'enveloppe climatique du réseau disparaissant des régions Centre, Nord-Est, Limousin et Aquitaine septentrionale au cours de la deuxième moitié du XXI^e siècle, même avec un scénario climatique en conformité avec les accords de Paris sur le climat (feuille de route européenne actuelle en matière d'engagements d'atténuation), il est urgent de mesurer les dispositifs qui peuvent encore l'être dans ces régions, au cours des deux décennies à venir. Les jardins communs étant âgés d'au moins 20 ans et souvent beaucoup plus, de nombreux caractères phénotypiques liés à l'adaptation seront mesurables et utilisables par les expérimentateurs et les modélisateurs, y compris des caractères de résistance aux agents biotiques et des enregistrements de réaction physiologique au climat dans les cernes de bois. Ces régions paraissent aussi tout indiquées pour l'installation de nouveaux dispositifs en jardin commun à long terme, notamment à base de taxons d'affinité méditerranéenne, actuellement faiblement représentés dans le réseau, mais dont la compatibilité avec les climats futurs est la plus large, en complément des expérimentations récemment mises en œuvre (Kebli *et al.*, 2021).



Photo 1 | Un jardin commun d'intérêt pour l'identification de génotypes pour la diversification de la forêt française dans le contexte du changement climatique : le test de provenances / descendances de sapin de Céphalonie (*Abies cephalonica* Loud.) en forêt domaniale de St Lambert, Vaucluse, récemment homologué « verger à graines »

Photo : © INRAE

Quelques régions demeurent stables, voire gagnent en compatibilité climatique au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle (Bretagne, Normandie, régions froides des montagnes). Le nombre de jardins communs y est actuellement plutôt faible voire inexistant. Y développer de nouveaux jardins communs avec une large palette de génotypes issus des taxons actuellement présents dans l'ensemble du réseau nous semble une piste à suivre en matière de recherche et développement.

La région méditerranéenne française mérite une mention particulière. Sous le scénario RCP8.5, elle se rajoute aux régions dont l'enveloppe climatique des jardins communs actuels disparaît (figure 6, p. 502, zones rouges). Elle contient des ressources génétiques (essentiellement testées localement) d'intérêt pour les régions fortement impactées par le changement climatique (photo 1, p. 503). À ce double titre, ses jardins communs méritent d'être suivis comme des vigies des effets des changements climatiques. La région méditerranéenne paraît aussi adaptée à l'installation de deux types de jardins communs :

- à court terme avec des espèces forestières majeures de l'économie forestière française, permettant de tester les limites adaptatives de leurs divers génotypes et origines géographiques à des stades précoces (niche de germination et niche de recrutement) ;
- à long terme en introduisant des essences rustiques résistantes à la sécheresse, en comparaison avec les génotypes locaux.

On peut penser à des autochtones comme le Pin d'Alep (récemment intégré à la norme NF B52 001 des bois de structure) et le Chêne vert qui couvrent de vastes espaces en Méditerranée et en France, au discret Érable de Montpellier, ou aux exotiques comme le Pin brutia, le Thuya de Berbérie, les sapins méditerranéens ou les chênes méditerranéens dont l'acclimatation en France n'est testée que dans quelques régions climatiques. Il est urgent d'établir une liste de ces espèces, plutôt méconnues, de les conserver et de les tester, dans un contexte dominé par l'incertitude sur les extrêmes climatiques, mais dont la tendance est bien aux climats plus chauds et secs en Europe occidentale. ■

Remerciements

Les données des jardins communs ont été vérifiées par leurs référents régionaux INRAE respectifs que nous remercions : Denis Vauthier (Unité expérimentale Entomologie et Forêts Méditerranéenne, Avignon), Frédéric Bernier (Unité expérimentale Forêt Pierron, Bordeaux) et Dominique Veisse (Unité expérimentale GBFOR, Orléans).

Les données climatiques actuelles et modélisées pour le futur ont été transmises par Maurizio Marchi (Institute of Biosciences and BioResources, Florence, Italie). Elles sont issues de l'outil de désagrégation spatiale des données climatiques qu'il a développé : <https://www.ibbr.cnr.it/climate-dt/>.

Nous remercions aussi Marta Benito Garzón (UMR Biogeco, INRAE Bordeaux) et Wilfried Thuiller (CNRS, Laboratoire d'écologie alpine, Grenoble) pour leurs conseils d'utilisation du modèle de niche utilisé et des analyses en découlant.

RÉFÉRENCES

- Aitken, S.N., Yeaman, S., Holliday, J.A., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1(1), 95-111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>.
- Alberto, F.J., Aitken, S.N., Alía, R., ... & Savolainen, O. (2013). Potential for evolutionary responses to climate change - evidence from tree populations. *Global Change Biology*, 19(6), 1645-1661. <https://doi.org/10.1111/gcb.12181>.
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2664.2006.01214.X>.
- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T., ... & Zanne, A.E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491, 752-755. <https://doi.org/10.1038/nature11688>.
- Coop, J.D., Parks, S.A., Stevens-Rumann, C.S., ... & Rodman K.C. (2020). Wildfire-Driven Forest Conversion in Western North American Landscapes. *BioScience*, 70(8) 659-673. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa061>.
- De Villemereuil, P. (2016). *Méthodes pour l'étude de l'adaptation locale et application au contexte de l'adaptation aux conditions d'altitude chez la plante alpine Arabis alpina*. Thèse de doctorat en sciences. Université Grenoble Alpes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01322336>.
- Elith, J., Leathwick, J.R., & Hastie, T. (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 77(4), 802-813. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2656.2008.01390.X>.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudik, M., En Chee Y., & Yates, C.J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57. <https://doi.org/10.1111/J.1472-4642.2010.00725.X>.
- Forzieri, G., Girardello, M., Ceccherini, G., ... & Cescatti, A. (2021). Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nat Commun*, 12, 1081. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21399-7>.
- Gallagher, R.V., Allen, S., & Wright, I.J. (2019). Safety margins and adaptive capacity of vegetation to climate change. *Scientific Reports*, 9, 8241. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44483-x>.
- Guisan, A., Edwards, T.C., & Hastie, T. (2002). Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*, 157(2-3), 89-100. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00204-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00204-1).
- Hao, T., Elith, J., Guillera-Aroita, G., & Lahoz-Monfort, J.J. (2019). A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD. *Diversity and Distributions*, 25(5), 839-852. <https://doi.org/10.1111/DDI.12892>.
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.
- IFN (2011). Les sylvoécorégions (SER) : Une nouvelle partition écologique et forestière du territoire métropolitain. *L'IF*, 26, 8 p. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/IF_SER_web.pdf.
- Kawecki, T.J., & Ebert, D. (2004). Conceptual issues in local adaptation. *Ecology Letters*, 7(12), 1225-1241. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00684.x>.
- Kebli, H., Perrier, C., Riou-Nivert, P., et al. (2021). Comment prioriser les efforts d'évaluation de nouvelles essences pour l'adaptation ? *Forêt entreprise*, 260, 22-26.
- Langlet, O. (1971). Two hundred years genecology. *Taxon*, 20(5/6), 653-721.
- Lefèvre, F., Fady, B., Jean, F., Davi, H., Pichot, C., & Oddou-Muratorio, S. (2015). Les processus biologiques de réponse des arbres et forêts au changement climatique : adaptation et plasticité phénotypique. *Innovations Agronomiques*, 47, 63-79. <https://hal.inrae.fr/hal-02632058>.
- Lowe, J., Bernie, D., Bett, P., ... & Belcher, S. (2019). UKCP 18 Science Overview Report November 2018 (Updated March 2019). <https://www.metoffice.gov.uk/pub/data/weather/uk/ukcp18/science-reports/UKCP18-Overview-report.pdf>
- Marchi, M., Castellanos-Acuña, D., Hamann, A., Wang, T., Ray, D., & Menzel, A. (2020). ClimateEU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe. *Scientific Data*, 7(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00763-0>.
- Martínez-Sancho, E., Rellstab, C., Guillaume, F., Bigler, C., Fonti, P., Wohlgemuth, T., & Vitasse, Y. (2021). Post-glacial re-colonization and natural selection have shaped growth responses of silver fir across Europe. *Science of the Total Environment*, 779, 146393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146393>
- Matyas, C. (1996). Climatic adaptation of trees: rediscovering provenance tests. *Euphytica*, 92, 45-54. <https://doi.org/10.1007/BF00022827>
- Médail, F., Monnet, A.C., Pavon, D., ... & Leriche, A. (2019). What is a tree in the Mediterranean Basin hotspot? A critical analysis. *Forest Ecosystems*, 6, 17. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0170-6>.
- MedECC (2020). Résumé à l'intention des décideurs. *Dans : Changement climatique et environnemental dans le bassin méditerranéen - Situation actuelle et risques pour le futur. Premier rapport d'évaluation sur la Méditerranée / Cramer W., Guiot J., Marini K. (eds.). Union pour la Méditerranée, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 35 p.*
- Michotey, C., Anger, C., Albet, A., ... & Fady, B. (2021). Metadata from common gardens of the Forest Genetics Network for Research and Experimentation (GEN4X). *Recherche Data Gouv*, V3. <https://doi.org/10.15454/50RS8C>.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., ... & Zurek, M. (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change, AR5 (IPCC Fifth Assessment Report). 132 p. <https://archive.ipcc.ch/pdf/supporing-material/expert-meeting-report-scenarios.pdf>
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca G.A.B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858.

- Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., ... & Kassem, K.R. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51(11), 933-938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
- Pecchi, M., Marchi, M., Burton, V., Gianenetti, F., Moriondo, M., Bernetti, I., Bindi, M., & Chirici, G. (2019). Species distribution modelling to support forest management. A literature review. *Ecological Modelling*, 411, 108817. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108817>.
- Pierangelo, A., & Ricodeau, N. (2017). Plantation et changement climatique : nouveaux conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 56, 3-8. <https://hal.science/hal-01930760/>.
- Rihm, G. (2021). *Représentativité climatique du réseau de dispositifs en jardins communs GEN4X et particulièrement des dispositifs méditerranéens sur le territoire français dans un contexte de réchauffement global*. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, VetAgro Sup, Clermont Ferrand (<https://hal.inrae.fr/hal-03374880>).
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., ... & Reyer, C.P. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Clim Change*, 7, 395-402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>.
- Thom, D., & Seidl, R. (2016). Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 91(3), 760-781.
- Thompson, I., Okabe, K., Tylianakis, J., Kumar, P., Brockerhoff, E.G., Schellhorn, N.A., Parrotta, J.A., & Nasi, R. (2011). Forest biodiversity and the delivery of ecosystem goods and services: Translating science into policy. *BioScience*, 61(12), 972-981. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.12.7>.
- Thuiller, W. (2004). Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology* 10, 2020-2027. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00859.x>.