

**PRISE EN COMPTE DE LA COMPÉTITION POUR LA
COMPARAISON DE DIFFÉRENTES PROVENANCES
DES PINS MÉDITERRANÉENS *PINUS HALEPENSIS*
MILL. ET *PINUS BRUTIA* TEN. - CAS DE LA
PLANTATION EXPÉRIMENTALE DE CEYRESTE**

LORNA ZEOLI

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

(CO)-PROMOTEUR(S): HUGUES CLAESSENS

**ENCADRANTS : MAXIME CAILLERET (INRAE)
LEA VEUILLEN (INRAE)**

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**PRISE EN COMPTE DE LA COMPÉTITION POUR LA
COMPARAISON DE DIFFÉRENTES PROVENANCES
DES PINS MÉDITERRANÉENS *PINUS HALEPENSIS*
MILL. ET *PINUS BRUTIA* TEN. - CAS DE LA
PLANTATION EXPÉRIMENTALE DE CEYRESTE**

LORNA ZEOLI

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

(CO)-PROMOTEUR(S): HUGUES CLAESSENS

**ENCADRANTS : MAXIME CAILLERET (INRAE)
LEA VEUILLEN (INRAE)**

ORGANISME D'ACCUEIL

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement (INRAE), au sein de l'équipe Écosystèmes Méditerranéens et Risques, sous la direction de Léa Veuillen et Maxime Cailleret (INRAE, Université Aix-Marseille, UMR RECOVER, Aix-en-Provence, France).

REMERCIEMENTS

J'arrive enfin à la seule partie que les gens liront attentivement, curieux de savoir si leur nom s'y retrouve, les remerciements.

Tout d'abord, je tiens à remercier mes superviseurs de l'INRAE, Léa Veuillen et Maxime Cailleret. Merci pour tous vos précieux conseils et tout le temps que vous m'avez consacré. Je tiens également à remercier les techniciens de l'équipe EMR, Mathieu, Jean-Michel et Andy, pour les nombreuses heures passées sur le terrain à se tordre le cou pour apercevoir le houppier des arbres. Également, merci à Fabien Guerra et Valentine Aubard pour l'aide avec le drone, je retiendrai que ce n'est pas une arme efficace contre les chenilles processionnaires. Je tiens également à adresser mes remerciements à l'URFM d'Avignon, tout particulièrement à Christian Pichot, pour le partage de leurs données et les réflexions qui ont permis d'enrichir ce travail.

Ensuite, je tiens à adresser mes remerciements à mon promoteur, M. Claessens, pour sa disponibilité, son écoute et ses conseils. Merci de nous transmettre les cours de forêts avec autant de passion.

Merci à ma famille de m'avoir encouragée tout au long de mes études, je n'y serais jamais parvenue sans votre aide et vos encouragements.

Merci à mes amis pour tous les bons moments passés ensemble et ceux à venir. Merci à toi, Alexia, de m'avoir supporté au kot pendant toutes ces années mais surtout, d'avoir été là dans les moments stressants des sessions d'examens.

Enfin, merci Maxime pour ton aide et ton soutien dans ce travail. Tu es une personne merveilleuse, j'en apprend beaucoup à tes côtés et j'espère que l'on vivra encore de nombreuses aventures.

RÉSUMÉ

Les changements climatiques ne sont pas nouveaux mais ceux auxquels nous sommes confrontés actuellement sont trop rapides pour permettre la migration ou l'adaptation d'organismes longévifs comme les arbres. Il devient donc urgent de trouver des espèces mieux adaptées aux conditions futures. Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) et le pin *brutia* (*Pinus brutia* Ten.) sont deux essences majeures des forêts méditerranéennes. Elles sont connues pour leur résistance à la sécheresse et fournissent de nombreux services comme la protection des sols, la production de résine et de bois. Aujourd'hui, les gestionnaires forestiers souhaitent valoriser ces espèces tout en assurant la résilience des forêts. Il convient donc de choisir le matériel génétique approprié pour satisfaire aux conditions environnementales actuelles et futures.

L'objectif de ce travail est de déterminer les meilleures provenances de pin d'Alep et pin *brutia* sur base de leurs performances (accroissement, hauteur, circonférence et survie) et caractéristiques de forme (rectitude du tronc et branchaison). Pour comparer ces provenances, il est nécessaire de considérer la compétition subie par les individus, qui affecte leurs performances. Pour ce faire, différents indices de compétition, issus de la littérature ou développés à partir des produits du drone (orthophoto, MNH, NDVI) sont utilisés.

Les indices issus des produits du drone (MNH et NDVI) présentent des résultats encourageants mais sont à améliorer, notamment par une détection automatique des houppiers.

Le pin *brutia* est, en moyenne, plus performant et plus droit que le pin d'Alep. La compétition établie au sein de la plantation semble être à la fois symétrique et asymétrique. Elle affecte négativement les performances et la rectitude du tronc des individus. La provenance la plus prometteuse semble être KISI (*P. brutia*), originaire de Turquie.

ABSTRACT

Climate change is not new, but the changes we are currently facing are too rapid to allow long-lived species adaptation or migration. There is an urgent need to find species that are adapted to future conditions. The Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) and the *brutia* pine (*Pinus brutia* Ten.) are two major species of Mediterranean forests. They are known for their resistance to drought and provide many services such as soil protection, resin and wood production. Today, forest managers want to promote these species while ensuring forest resilience. It is therefore necessary to select the appropriate genetic material to meet current and future environmental conditions.

The purpose of this work is to determine the most suitable aleppo pine and *brutia* pine provenance, based on their performance (increment, height, circumference and survival) and their form characteristics (trunk straightness and branching). In order to compare these provenances, it is interesting to consider the competition experienced by the individuals, which affects their performance. For this purpose, different competition indices from the literature or developed with UAV products (orthomosaic, DEM, NDVI) are used.

The indices derived from drone products (DEM and NDVI) show encouraging results but need to be improved, especially by implementing an automatic detection of tree crowns.

The *brutia* pine is, on average, more performing and straight than the aleppo pine. The competition experienced by trees within the plantation seems to be both symmetric and asymmetric. It negatively affects the performance and trunk straightness of the individuals. The most promising provenance seems to be KISI (*P. brutia*) originating from Turkey.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	1
Table des matières.....	3
1. État de l’art.....	5
1.1. Particularités de la région méditerranéenne.....	5
1.2. Le pin d’Alep et le pin <i>brutia</i>	6
1.2.1. Description morphologique.....	6
1.2.2. Type de sol et climat.....	7
1.2.3. Répartition géographique.....	7
1.2.4. Situation en région Sud.....	8
1.2.5. Production et valorisation.....	8
1.3. Le changement climatique en Méditerranée.....	10
1.4. Conséquences du changement climatique sur les écosystèmes forestiers.....	10
1.4.1. Impacts du changement climatique sur les forêts.....	10
1.4.2. Mécanismes d’adaptation des forêts.....	11
1.5. Stratégies d’adaptation via la gestion forestière.....	13
1.6. La migration assistée et les essais de provenances.....	13
1.7. Caractérisation de la compétition à l’échelle de l’arbre.....	15
1.7.1. Généralités.....	15
1.7.2. Utilisation de produits drones pour la caractérisation de la compétition.....	16
2. Définition des objectifs du travail.....	17
3. Matériel et méthodes.....	17
3.1. Site d’étude et dispositif expérimental.....	17
3.2. Collecte des données.....	18
3.2.1. Base de données disponible.....	18
3.2.2. Collecte des images à très haute résolution.....	19
3.2.3. Données relatives aux caractéristiques de forme et aux défauts.....	20
3.2.4. Données relatives à la compétition.....	22
3.3. Caractérisation de la compétition à l’échelle de l’arbre.....	23
3.3.1. Sélection des indices de compétition.....	23
3.3.2. Les indices de compétition développés à partir des produits du drone.....	24
3.3.2.1. Indice basé sur le modèle numérique de hauteur (MNH).....	24
3.3.2.2. Indice CV basé sur le NDVI.....	26
3.3.3. Sélection du rayon de compétition.....	27

3.4. Comparaison des performances des provenances.....	27
4. Résultats.....	30
4.1. Indices de compétition sélectionnés.....	30
4.1.1. Indices issus de la littérature et résultats de l'indice MNH.....	30
4.1.2. Indices issus des produits du drone.....	32
4.1.2.1. Comparaison des hauteurs vertex et MNH.....	32
4.1.2.2. Modèles de prédiction du rayon du houppier des arbres.....	33
4.1.2.3. Indice basé sur le NDVI.....	34
4.2. Comparaison des espèces et provenances.....	34
4.2.1. Comparaison des performances et des caractéristiques de forme.....	34
4.2.2. Effet de la compétition sur les performances des arbres et la forme du tronc.....	38
5. Discussion.....	40
5.1. Les indices de compétition.....	40
5.1.1. Indices de compétition issus de la littérature.....	40
5.1.2. Indices de compétition issus des produits du drone.....	42
5.1.2.1. Indice basé sur le modèle numérique de hauteur (MNH).....	42
5.1.2.2. Indice basé sur l'indice de végétation NDVI.....	43
5.1.3. Généralités concernant la méthodologie de recherche du rayon de compétition optimal.....	44
5.1.4. Comparaison des indices issus des produits du drone et de la littérature.....	44
5.2. Comparaison des performances des espèces et provenances.....	45
5.2.1. Comparaison des performances et caractéristiques de forme.....	45
5.2.1.1. La rectitude du tronc.....	45
5.2.1.2. La survie.....	45
5.2.1.3. La hauteur.....	46
5.2.1.4. La branchaison.....	46
5.2.1.5. Synthèse.....	46
5.2.2. Effet de la compétition sur les performances et la rectitude du tronc.....	47
5.2.2.1. Discussion générale sur les modèles statistiques.....	47
5.2.2.2. La rectitude du tronc.....	48
5.2.2.3. La croissance.....	48
5.2.2.4. Les défauts.....	48
6. Conclusion.....	49
7. Annexes.....	50
8. Bibliographie.....	56

1. ÉTAT DE L'ART

1.1. Particularités de la région méditerranéenne

La région méditerranéenne constitue une zone d'intérêt majeure pour la science, notamment pour l'étude de l'adaptation des écosystèmes aux changements climatiques. Elle possède des caractéristiques tout à fait particulières¹, notamment en ce qui concerne la partie française :

- des variabilités géographique et topographique atypiques avec la présence d'un littoral dentelé, entouré de hautes chaînes de montagnes, créant des gradients bioclimatiques marqués ;
- un climat constitué de deux saisons fortement marquées : l'été est chaud et sec tandis que l'automne et l'hiver sont humides et frais. Les précipitations peuvent être violentes et leur variabilité annuelle est importante. Des vents forts et secs sont fréquents dans cette région ;
- une grande diversité faunistique et floristique associée à une importante richesse des types de végétation et des formes d'utilisation du sol, donnant lieu à une structure complexe en mosaïque. Le bassin méditerranéen figure parmi les *hotspots* de biodiversité, abritant près de 8 % des espèces végétales du monde, dont 60 % sont endémiques² ;
- un impact des activités humaines depuis des millénaires qui a façonné les forêts et paysages, comme en témoignent les plantations de pins parasols (*Pinus pinea* L.), cyprès commun (*Cupressus sempervirens* L.) et châtaigniers (*Castanea sativa* Mill.).

Les communautés végétales méditerranéennes sont généralement dominées par des plantes ligneuses sclérophylles avec un sous-étage herbacé ou arbustif. Les plantes méditerranéennes possèdent un panel d'adaptations morphologiques et physiologiques en réponse au déficit hydrique. Par exemple, leur système racinaire permet de rechercher l'eau dans les horizons profonds du sol en période de sécheresse³. Dans le bassin méditerranéen, le feu constitue également une perturbation non négligeable qui a contribué à façonner la végétation⁴. Pour faire face aux incendies, les espèces végétales possèdent différents traits adaptatifs, comme une écorce épaisse les protégeant du feu, et des graines résistantes à de hautes températures⁵. Ces adaptations à la sécheresse et aux incendies sont notamment présentes chez les pins d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) et *brutia* (*Pinus brutia* Ten.). Ces deux espèces ne passent pas inaperçues dans le paysage, couvrant ensemble près de sept millions d'hectares⁶. Dans le contexte du changement climatique, elles représentent un sujet d'étude important, du fait de leur résistance particulière à la sécheresse et leur capacité de survie dans de larges gammes de conditions environnementales⁷.

1.2. Le pin d'Alep et le pin *brutia*

1.2.1. Description morphologique

Le pin *brutia* peut atteindre 35 mètres de hauteur et vit généralement entre 120 et 150 ans tandis que le pin d'Alep atteint 24 - 25 mètres avec une longévité comparable au pin *brutia*⁸. Pendant le jeune âge, l'écorce du pin *brutia* est rougeâtre et de teinte gris argenté chez le pin d'Alep. Au stade adulte, l'écorce des deux espèces est de plus en plus crevassée, les fissures étant de couleur brun rougeâtre chez *brutia*⁸ et plutôt grisâtre voire brun roussâtre chez le second⁶ (Figure 1). En ce qui concerne le tronc, il est généralement sinueux voire tortueux chez le pin d'Alep et plus droit pour le pin *brutia*⁶.

Les aiguilles sont groupées par deux dans le brachyblaste et atteignent 10 à 15 cm de long chez le pin *brutia* contre 6 à 10 cm chez le pin d'Alep. Enfin, le houppier de ce dernier est plus clair et parsemé. Avec l'âge, la cime adopte une forme tabulaire chez les deux espèces bien que le pin *brutia* peut conserver une cime conique en bonnes conditions stationnelles⁸.



Figure 1. Tronc du pin *brutia* (gauche) et du pin d'Alep (droite).

Les cônes du pin *brutia* sont sessiles et contiennent des graines de 6 à 9,5 mm de longueur avec une aile de 15 à 20 mm ; les cônes du pin d'Alep présentent un pétiole d'une longueur de 2 à 3 cm avec des graines de 5 à 6 mm de longueur et une aile de 20 mm⁹ (Figure 2).

Le pin d'Alep possède une double stratégie de reproduction, portant à la fois des cônes sérotineux et non-sérotineux⁴. La sérotonie correspond à la rétention de graines mûres dans une banque de graines située dans la canopée et dont la dispersion est retardée¹⁰. Les cônes sérotineux sont scellés par une couche de résine qui est amenée à fondre dans une gamme de température donnée, variant de 40 à 50 °C dans le cas du pin d'Alep¹¹. Le caractère sérotineux est moins prononcé chez le pin *brutia*⁹.



Figure 2. Cônes du pin *brutia* (gauche) et du pin d'Alep (droite).

1.2.2. Type de sol et climat

Le pin d'Alep apprécie particulièrement les substrats marneux et calcaro-marneux où les sols sont profonds, mais il colonise également les calcaires compacts et diaclasés en Provence et en Algérie ainsi que les substrats non calcaires de type schistes et micaschistes. En revanche, cette espèce

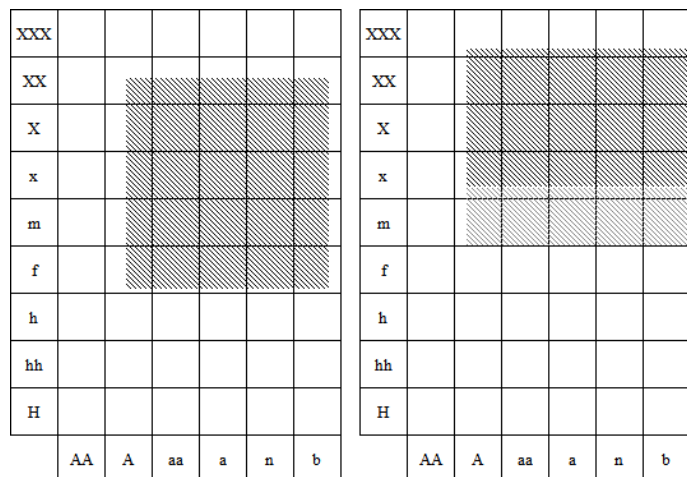


Figure 3. Écogrammes du pin *brutia* (gauche) et du pin d'Alep (droite).

semble ne pas affectionner les granites et gneiss ni les substrats sablonneux ou présentant une nappe aquifère permanente menant à l'asphyxie de son système racinaire. Ainsi, elle préfère essentiellement des substrats meubles ou friables¹².

Le pin *brutia* possède des exigences assez semblables au pin d'Alep ; il affectionne également les substrats meubles et profonds ou fissurés. A l'état naturel, il se rencontre davantage sur des marnes et calcaires marneux. Tout comme le pin d'Alep, le pin *brutia* ne supporte pas les sols mal drainés¹² (Figure 3).

Dans la partie Nord de sa distribution (ex. France, Croatie), le pin d'Alep s'établit dans la zone côtière, du niveau de la mer jusqu'à 600 m d'altitude. Dans la partie Sud (ex. Maroc, Tunisie), il peut se retrouver jusqu'à 1400 m d'altitude. Les conditions optimales relatives à cette espèce se situent entre 350 et 700 mm de précipitations annuelles et -2 à 10 °C en températures minimales absolues⁹.

Le pin *brutia* est moins thermophile avec une gamme de températures minimales absolues située entre -5 et 10 °C et est plus exigeant au niveau de la demande en eau, avec des précipitations annuelles entre 400 et 1300 mm⁹.

1.2.3. Répartition géographique

Le pin d'Alep et le pin *brutia* couvrent ensemble une superficie de plus de 7 millions d'hectares autour du bassin méditerranéen. Ces deux espèces occupent une aire de répartition dite circumméditerranéenne mais leurs distributions géographiques et niches bioclimatiques sont différentes¹².

Le pin d'Alep s'étend sur la partie occidentale du pourtour méditerranéen (entre 45° et 31° N ; Figure 4), y compris en Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie, Libye), dans les régions méridionales de France, l'Italie, de l'Est de l'Espagne, la Grèce et Malte. L'espèce se retrouve également sur les zones côtières de Croatie et d'Albanie. Il existe aussi quelques populations naturelles et artificielles en Turquie, Jordanie, Israël, Liban et Syrie⁹.

Le pin *brutia* occupe la partie orientale de la méditerranée (entre 44° et 35° N ; Figure 4), de la Grèce à la Crimée orientale, la Géorgie, le Nord de l'Irak, l'Ouest de la Syrie, le Liban et Chypre.

Cette espèce est particulièrement abondante en Turquie, expliquant son nom commun de pin rouge de Turquie. En Italie, cette espèce n'est pas indigène bien qu'elle soit naturalisée dans certaines zones de collines au sud de la Calabre et dans le Salento, où elle a probablement été introduite par les romains⁹.

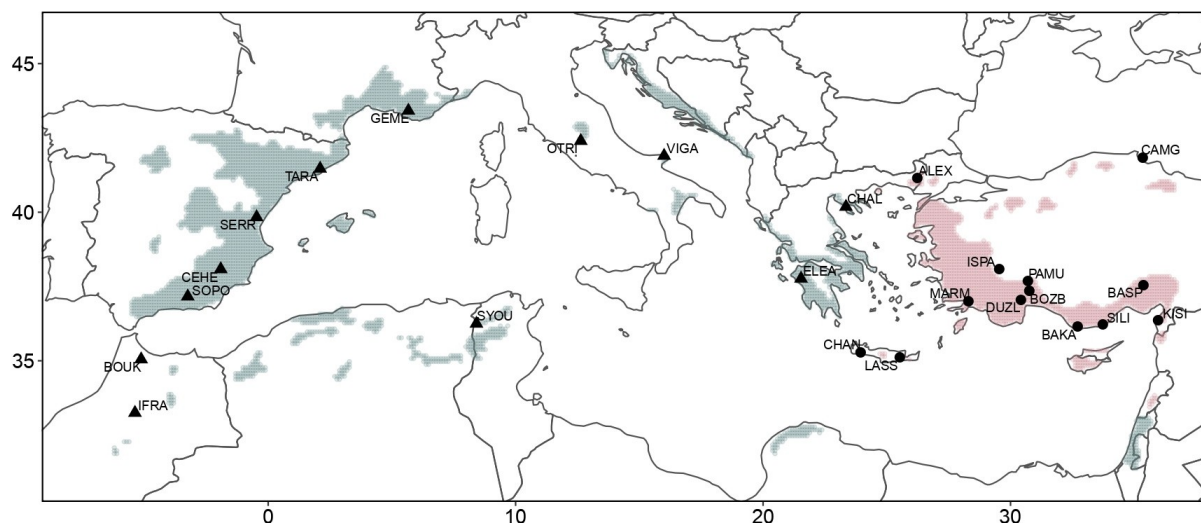


Figure 4. Répartition du pin d'Alep (gris) et du pin *brutia* (rose) ainsi que les provenances utilisées dans ce travail (points pour le pin *brutia* et triangles pour le pin d'Alep).

1.2.4. Situation en région Sud

Selon les campagnes menées de 2009 à 2013 par l'Inventaire Forestier National (IFN)¹³ en région Sud, le pin d'Alep représente l'une des essences principales, avec 164 000 ha (\pm 21 000 ha) pour une surface forestière de production totale de 1 340 000 ha (\pm 36 000 ha). Le pin d'Alep se retrouve en peuplement monospécifique sur 88 000 ha (\pm 15 000 ha), soit 57 % de la surface où il est considéré comme essence principale¹⁴. La surface dominée par cette espèce a été multipliée par sept au cours de ces 150 dernières années, cette expansion s'expliquant par le caractère pionnier de l'espèce qui colonise les terres abandonnées suite à la déprise agricole¹⁵.

Quant au pin *brutia*, il a été introduit en France il y a une cinquantaine d'années afin de remplacer le pin d'Alep pour le reboisement. On le retrouve également dans des parcs ou en forêt, en mélange avec le pin d'Alep.

1.2.5. Production et valorisation

En région Sud, le volume total de bois sur pied du pin d'Alep est estimé à 14 millions de m³, dont 3 Mm³ (\pm 1 Mm³) en forêt publique et 11 Mm³ (\pm 2 Mm³) en forêt privée. Ce volume représente 18 % du volume total de tous les résineux et 12 % du volume total de toutes les essences. En forêt de production, 8 Mm³ (\pm 2 Mm³) de pin d'Alep sont classés en bois d'œuvre, soit 57 % de son volume total ; le reste se retrouve en classe de qualité 3 (bois industrie et bois énergie)¹³.

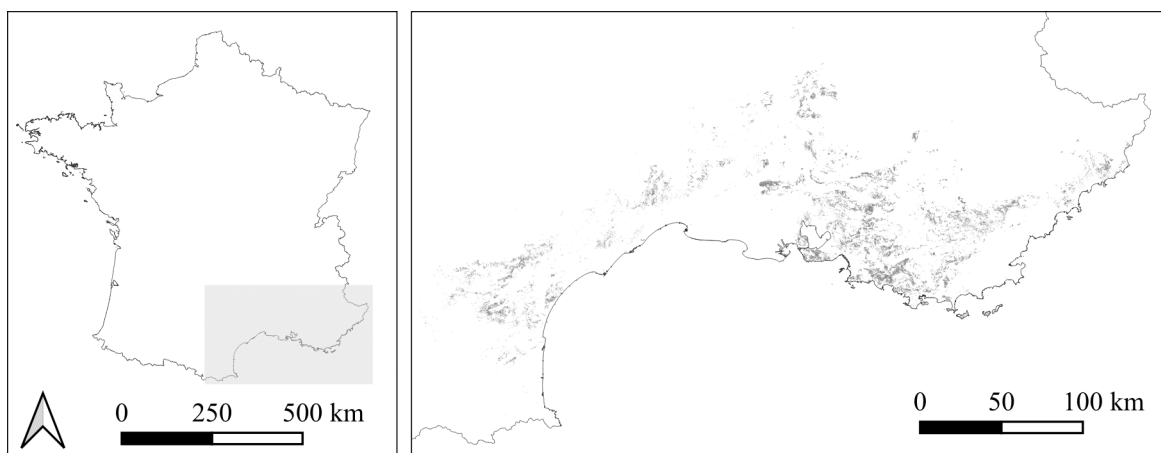


Figure 5. Localisation et distribution du pin d'Alep en France méditerranéenne (IGN France).

Les productivités moyennes annuelles du pin d'Alep et du pin *brutia* sont estimées à 1 - 3 m³ ha⁻¹ an⁻¹ et 2 - 3 m³ ha⁻¹ an⁻¹, respectivement. Elles peuvent monter jusqu'à 12 à 15 m³ ha⁻¹ an⁻¹ pour les deux espèces lorsque les conditions stationnelles sont très favorables⁹.

En France et en Espagne, le pin d'Alep est largement utilisé pour la protection des sols contre l'érosion ; ses graines sont valorisées dans la confection de pâtisseries en Tunisie. En Italie, l'espèce sert également de brise-vent dans les zones côtières⁹. Aujourd'hui, son utilisation réside principalement dans la fabrication de pâte à papier^{16,17}, la protection des espaces dunaires et l'ornement⁹.

Au vu du volume de bois disponible, une meilleure valorisation du pin d'Alep se justifie tant pour les forêts privées que publiques. Une espèce devient intéressante pour l'industrie du bois lorsqu'elle répond à différents critères de qualités de forme (rectitude du tronc), physiques et mécaniques. Cependant, l'intérêt du pin pour ce secteur est contraint pour les raisons suivantes¹⁸ :

- sa forme tortueuse conduit à une perte de rendement en première transformation ;
- son bois, riche en résine, conduit à l'encrassement des outils et à la détérioration de la mouillabilité des surfaces produites pendant l'usinage ;
- la présence de nombreux nœuds dans le bois diminue la résistance mécanique de ce matériau, rendant difficile son usinage.

Toutefois, Thibaut et al.¹⁹ ont montré que les propriétés intrinsèques du bois du pin d'Alep étaient semblables à celles du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.), utilisé dans la fabrication de panneaux mais également en charpente. Selon Langbour et al.¹⁷, le pin d'Alep présente des propriétés physiques et mécaniques satisfaisantes pour être valorisé en menuiserie, caisserie et charpente. Depuis 2018, le pin d'Alep a d'ailleurs été introduit dans la norme NF B 52001-1²⁰, permettant son utilisation en tant que bois de structure.

1.3. Le changement climatique en Méditerranée

La région méditerranéenne est d'ores et déjà impactée par le changement climatique, la fréquence et l'intensité des sécheresses ayant augmenté depuis 1950²¹. D'ailleurs, cette région figure parmi les *hotspots* du changement climatique²², notamment à cause de la forte variabilité interannuelle des précipitations²³. L'augmentation des vagues de chaleur et des sécheresses entraîne des risques accrus d'incendie, des saisons de feu plus fréquentes et prolongées ainsi que des feux sévères et de plus large ampleur²¹.

Les taux de changements climatiques observés dans le bassin méditerranéen dépassent les tendances mondiales, avec des températures annuelles moyennes 1,4°C au-dessus des niveaux de la fin du 19^{ème} siècle²¹.

1.4. Conséquences du changement climatique sur les écosystèmes forestiers

1.4.1. Impacts du changement climatique sur les forêts

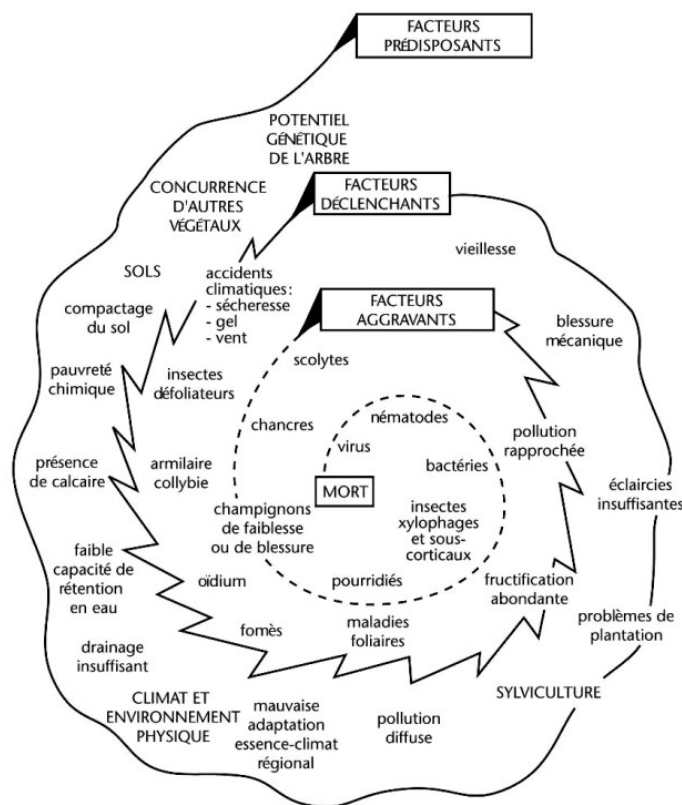


Figure 6. Spirale de déclin de Manion¹⁰⁸ adaptée par Landmann¹⁰⁶. Elle illustre l'enchaînement des trois facteurs (prédisposants, déclenchants et aggravants) menant à la mort de l'arbre.

Les épisodes de sécheresse sont particulièrement alarmants pour les écosystèmes forestiers puisqu'ils affectent leur productivité primaire²⁴ et la croissance radiale des arbres, et causent des phénomènes de dépérissement et de mortalité²⁵ observables dans le monde entier²⁶ (Figure 7). Ils sont de plus en plus intenses et nombreux en méditerranée, affectant la croissance des pins et causant la défoliation du houppier. Certaines espèces de pins méditerranéens, comme le pin d'Alep, pourtant connues pour leur résistance à la sécheresse, commencent d'ailleurs à montrer des signes de dépérissement^{27,28}.

Des événements de dépérissement d'espèces résineuses, notamment du pin d'Alep, ont été associés aux attaques de scolytes dans des zones sujettes à la sécheresse²⁹⁻³¹. Les accidents climatiques tels que les sécheresses agissent comme facteur déclenchant en affaiblissant l'arbre, l'exposant davantage aux maladies et insectes ravageurs (Figure 6).

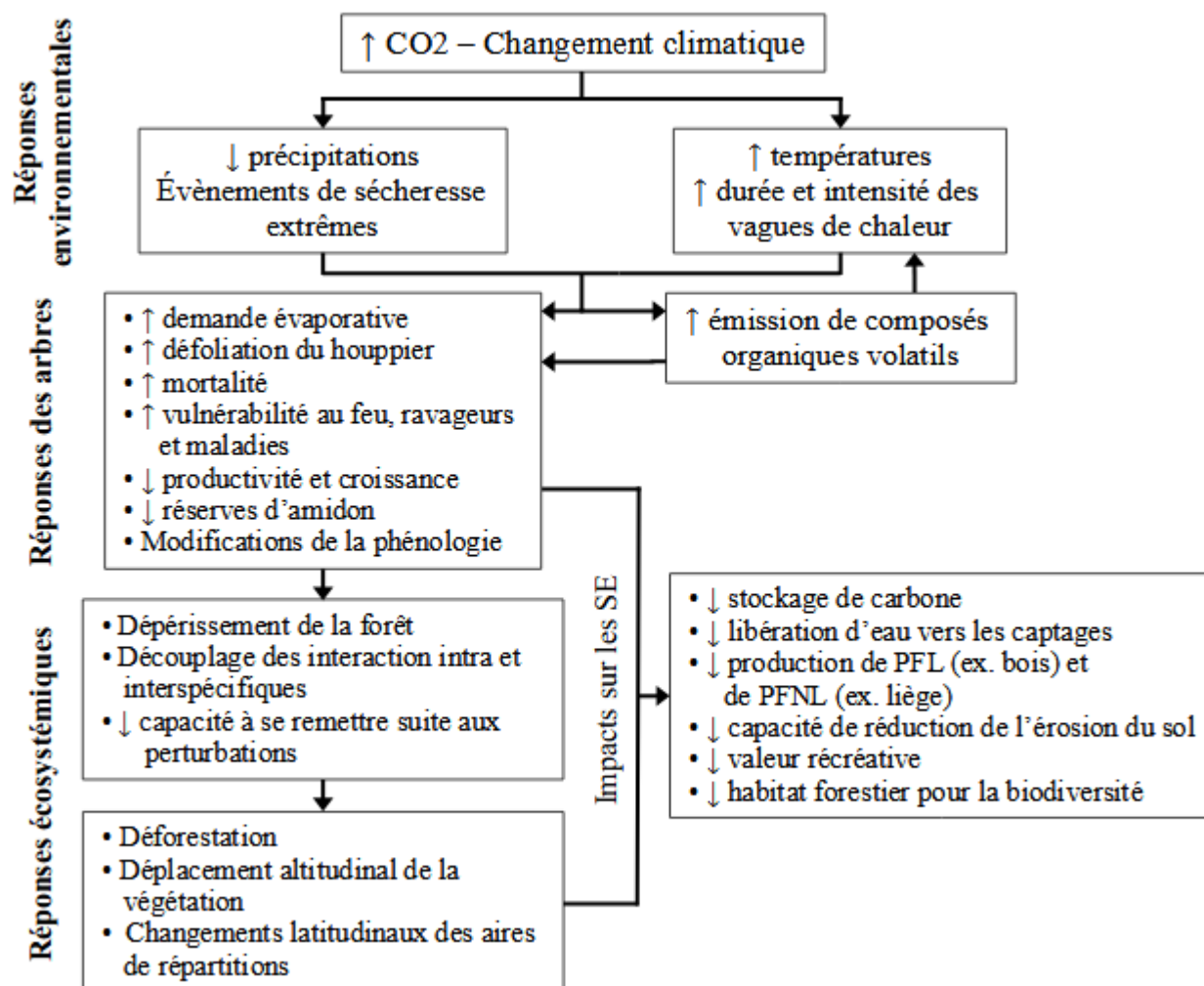


Figure 7. Réponses des arbres et écosystèmes forestiers méditerranéens aux changements environnementaux associés au changement climatique et leurs impacts sur les services écosystémiques. Adapté de MedECC¹⁰⁷.

1.4.2. Mécanismes d'adaptation des forêts

Les forêts présentent différentes réponses adaptatives face au changement climatique :

1. Plasticité phénotypique

Les plantes sont capables de faire face au changement climatique en modifiant un ensemble de traits fonctionnels (ex : modification de la taille des feuilles en réponse à une variation climatique³²). Un trait est défini comme une propriété bien déterminée et mesurable à l'échelle de l'individu ; il est dit fonctionnel lorsqu'il influence les performances de l'organisme³³. La performance (*fitness*) d'un individu est définie comme l'abondance relative et le succès de ses gènes sur plusieurs générations. Sa mesure directe est compliquée voire impossible, particulièrement pour les espèces longévives comme les arbres. Par conséquent, la biomasse totale, le nombre de graines, le taux de survie et de

croissance d'une seule génération sont utilisés comme substituts de la *fitness*³⁴. Au sein d'une population, la grande variabilité d'un trait fonctionnel indique une richesse génétique et/ou une capacité d'acclimatation, essentielles dans les processus d'adaptation. Une importante plasticité phénotypique permet aux espèces de survivre dans une large gamme de conditions environnementales et donc d'avoir des réponses plus souples face au changement climatique³⁵.

2. Adaptation locale

L'adaptation locale correspond à une évolution ayant lieu à l'échelle locale, débouchant sur la sélection de nouveaux génotypes appartenant à la même espèce et mieux adaptés dans leur nouvel environnement (*i.e.* les génotypes sélectionnés sont ceux qui présentent la meilleure croissance, survie et reproduction)³⁵. L'adaptation est souvent étudiée via la mise en place de « jardins communs » sur différents sites où sont rassemblées plusieurs provenances d'une même espèce³⁶. Les génotypes locaux sont supposés être mieux adaptés aux conditions locales étant donné que la sélection naturelle augmente la fréquence de gènes améliorant la *fitness*³⁷. L'adaptation locale correspond à la différence entre la *fitness* des populations locales et celle des populations non locales³⁸. La sensibilité des forêts au changement climatique s'explique notamment par la longévité des arbres, qui ne permet pas une adaptation suffisamment rapide par rapport aux modifications environnementales³⁹.

3. Migration

La migration des espèces en réponse aux variations du climat a déjà été observée par le passé, notamment suite à la dernière période glaciaire il y a 10 000 ans. A cette époque, les espèces des forêts décidues étaient cantonnées dans des zones aux conditions favorables nommées refuges. Le réchauffement postglaciaire a permis aux espèces de migrer à partir de ces refuges au début de la période de l'holocène, étendant ainsi leur aire de répartition⁴⁰. La palynologie indique une vitesse de migration rapide des populations d'arbres, de l'ordre de 100 à 1000 m an⁻¹, lors du réchauffement postglaciaire en Amérique du Nord et en Europe. De telles vitesses de migration sont difficiles à expliquer compte tenu des connaissances actuelles sur la dispersion des graines. C'est ce que l'on nomme le paradoxe de Reid : un taux de migration bien plus rapide que ce que la dispersion des graines ne permet. Certaines théories tentent d'expliquer ce paradoxe par la dispersion, des populations isolées ayant persisté grâce à un microclimat plus favorable que le climat régional mais ces dernières n'apparaissent pas dans les archives polliniques⁴¹.

Pour faire face à la rapidité des changements climatiques actuels, le taux de migration requis est estimé à plus de 1000 m par an⁴². De nombreux auteurs s'inquiètent quant à la probable incapacité des plantes à migrer assez rapidement vers des zones aux conditions plus favorables⁴³, surtout pour des organismes sédentaires à longue durée de vie comme les arbres⁴⁴. McLachlan et al.⁴⁵ ont confirmé la théorie de dispersion locale à partir de populations isolées, impliquant des taux de

migration plus faibles que ceux donnés par la palynologie. Ceci renforce la crainte d'un taux de migration insuffisant des espèces.

1.5. Stratégies d'adaptation via la gestion forestière

Au vu de la vitesse des changements environnementaux par rapport, d'une part, à celle de l'adaptation naturelle des écosystèmes forestiers, et d'autre part, aux délais plutôt longs associés à la gestion forestière (âge d'exploitabilité du pin sylvestre : > 100 ans ; épicéa commun : 50 à 80 ans ; chêne pédonculé : 100 à 150 ans)⁴⁶, des stratégies d'adaptation à ces changements doivent être rapidement mises en œuvre. Le défi est donc de taille pour le monde forestier qui doit pouvoir maintenir les services fournis par les écosystèmes dans un tel contexte⁴⁷.

Afin d'aider les espèces à lutter contre les changements climatiques, différentes stratégies de gestion sont proposées pour augmenter leur résistance et capacité de rétablissement aux perturbations⁴⁸ :

- diminuer la densité des peuplements pour limiter la demande en eau et la compétition pour les ressources ;
- gérer le sous-bois pour diminuer le risque d'incendie ;
- promouvoir la mixité dans les forêts avec des espèces aux réponses diversifiées pour bénéficier de la complémentarité entre espèces et atténuer les effets des perturbations ;
- enrichir les forêts avec des espèces/génotypes mieux adaptées aux futures conditions climatiques via la migration assistée (voir 1.6) ;
- favoriser l'hétérogénéité spatiale à l'échelle du paysage et renforcer la connectivité pour assurer les flux de gènes et la migration des espèces.

1.6. La migration assistée et les essais de provenances

Parmi ces stratégies, seule la migration assistée sera développée ici étant donné le contexte de l'étude. Elle se définit comme le déplacement intentionnel des espèces et populations afin de faciliter ou d'imiter l'expansion naturelle de leur aire de répartition⁴⁹. Les espèces forestières sont très souvent ciblées dans le domaine de la migration assistée étant donné leur valeur économique⁵⁰ et leur importance écologique, les forêts dominantes de nombreux écosystèmes terrestres localisés dans des régions fortement menacées par le changement climatique⁴⁴. Cette stratégie consiste à renforcer la résilience des forêts en les diversifiant avec des espèces, génotypes ou provenances mieux adaptées aux futures conditions climatiques, par exemple à la sécheresse⁵¹. Toutefois, elle a été largement critiquée car l'introduction d'espèces en dehors de leur aire de répartition d'origine comporte des risques écologiques difficiles à prédire⁵². Certains craignent en effet que ces organismes y présentent un caractère invasif et constituent alors une menace pour les espèces indigènes⁵³. La migration assistée peut échouer, comme ce fut le cas de populations portugaises de pin maritime introduites en France. Ces populations étaient très sensibles au gel, ce qui a conduit à d'importantes pertes économiques à la suite du gel de 1985⁵⁴.

Depuis longtemps, les essais de provenances ont été réalisés afin de déterminer le matériel génétique adéquat pour le reboisement en assurant un compromis entre productivité et adaptation au climat⁵². Les premiers essais de provenances ont débuté en France en 1745 car la marine de guerre manquait de bois pour la construction des navires. Pour répondre à ce besoin, H.L. Duhamel du Monceau, agronome et fondateur de la science de la botanique forestière, a mis en place des cultures comparatives de pins des provinces baltes et des régions voisines de la Russie, de l'Écosse et de plusieurs autres régions d'Europe Centrale⁵⁵.

Les études portant sur les essais de provenances impliquent l'utilisation de semences de populations naturelles localisées à des endroits variés dans l'aire de répartition de l'espèce considérée. Généralement, ces provenances sont plantées dans un ou plusieurs sites selon un plan expérimental bien défini⁵⁶. La plantation suit souvent un dispositif en blocs aléatoires, complet lorsque toutes les provenances sont répétées au sein de chacun des blocs, ou incomplet si les blocs ne contiennent pas toutes les provenances⁵⁷. La disposition en blocs permet de contrôler l'hétérogénéité spatiale des conditions environnementales liée au sol et au microclimat. Les plantations font ensuite l'objet d'un suivi temporel au cours duquel différentes variables sont mesurées, comme la hauteur, le diamètre ou le taux de survie. Les provenances les mieux adaptées présentent les meilleurs taux de survie et croissance mais, contrairement à ce que l'on pourrait croire, la provenance locale ne figure pas toujours parmi celles-ci⁵⁶.

En 1974, la FAO (Food and Agriculture Organization) a monté un projet visant à promouvoir les zones de distribution primaires des pins de la section *halepensis*⁵⁸. Dans le cadre de ce projet, des plantations contenant différentes provenances de pin d'Alep, *brutia* et *eldarica* (*Pinus eldarica* Medw.) ont été installées dans de nombreux pays du bassin méditerranéen, dont la France. La plantation comparative, étudiée dans le cadre de ce travail, a été installée en 1976. L'objectif initial était de comparer la variabilité génétique et phénotypique des espèces *P. halepensis*, *P. brutia* et *P. eldarica*^{59,60}.

La rapidité des changements climatiques nous contraint à anticiper en matière d'essences et/ou de provenances qui composeront la forêt de demain. Les expérimentations de provenances sont par conséquent essentielles pour guider au mieux les propriétaires et gestionnaires forestiers dans leurs choix. Dans cette optique, de nombreux projets ont vu le jour, notamment *RENEssences*, *Esperense* (France) et *Trees for future* (Belgique), dont l'objectif est de tester les performances (croissance, survie, valorisation) de nouvelles provenances ou essences moins connues comme, par exemple, le pin *brutia*.

1.7. Caractérisation de la compétition à l'échelle de l'arbre

Pour effectuer la comparaison des différentes provenances, il est nécessaire de considérer la compétition subie par les individus, qui affecte les performances de ceux-ci.

1.7.1. Généralités

La croissance d'un arbre est influencée par de nombreux facteurs tels que son âge et sa dimension, le climat, les perturbations d'origine naturelle ou anthropique, le micro-environnement (exposition, pente, nature du sol,...), la génétique ainsi que la compétition inter- et intraspécifique⁶¹.

La compétition correspond à une interaction négative entre deux organismes et s'exerce par interférence directe ou de manière indirecte par l'exploitation des ressources⁶². La concurrence exercée par les arbres voisins est un facteur biotique contribuant à limiter la croissance⁶³, car le manque de ressources qu'elle induit constitue un stress à long terme pouvant affecter les bilans en eau et carbone des arbres⁶⁴. Les individus subissent ainsi une compétition pour les ressources aériennes (lumière) et souterraines (eau, nutriments)⁶¹. On parle de compétition asymétrique lorsque les individus les plus grands obtiennent une part disproportionnée des ressources au détriment de leurs voisins de plus petite taille et de compétition symétrique lorsque l'utilisation des ressources par les individus est proportionnelle à leur taille relative⁶⁵. On considère la compétition pour la lumière comme étant asymétrique tandis que la compétition pour les ressources souterraines est symétrique⁶⁶.

Une forte compétition pour les ressources affecte aussi la réponse des arbres à un événement de sécheresse extrême, à savoir leur résistance et leur capacité de rétablissement. La résistance quantifie la réduction de croissance pendant la perturbation, et le rétablissement évalue la capacité de récupération de croissance par rapport à sa réduction induite par la sécheresse. Ces indices sont souvent regroupés au sein du terme « résilience », qui mesure la capacité de la croissance à revenir à son niveau avant perturbation⁶⁷. Le changement climatique pourrait impacter la croissance des arbres de manière directe à cause des contraintes abiotiques (stress hydrique) mais également indirectement en modifiant l'intensité de la compétition pour les ressources⁶⁸. Dans un tel contexte, il devient urgent de pouvoir caractériser au mieux l'effet de la compétition sur la croissance des arbres en réponse aux épisodes de sécheresse.

Les effets de la compétition sont étudiés depuis longtemps afin de prédire la croissance des arbres de la manière la plus exacte possible⁶⁹. Toutefois, la mesure directe de la compétition est problématique car elle demande beaucoup de temps et d'appareillages sophistiqués. Les indices de compétition permettent de s'affranchir de ces contraintes par leur facilité d'emploi et de mise en œuvre⁶¹. Ces indices décrivent le degré d'occupation de l'espace de croissance d'une plante par d'autres plantes⁷⁰. Leur rôle consiste à indiquer le statut concurrentiel d'un arbre donné en regard de ses voisins, et ils peuvent être employés en tant que variables prédictives dans les modèles de croissance⁷¹.

Les indices de compétition se répartissent en deux grandes classes : les indices dépendants de la distance qui utilisent l'information de localisation exacte des individus, et les indices indépendants de la distance pour lesquels la connaissance de la position exacte des arbres n'est pas employée de

manière explicite dans la formule⁷². L'utilisation de la taille des arbres et de leur localisation exacte pourraient améliorer la caractérisation de la compétition mais la littérature semble ne pas être unanime sur le sujet : il n'existe pas d'indice universel ou de classe d'indices qui soient meilleurs que les autres⁷³.

La caractérisation de la compétition requiert ainsi des données telles que la hauteur, la circonférence ou la localisation précise des arbres. Leur acquisition représente un travail considérable et chronophage et est quelquefois rendue difficile par les conditions d'accessibilité du terrain (peuplement dense, forte pente, ...). Aujourd'hui, l'utilisation du drone pourrait être une solution pour effectuer ce travail plus rapidement.

1.7.2. Utilisation de produits drones pour la caractérisation de la compétition

Ces dernières années, l'utilisation des drones pour l'acquisition de données connaît un véritable succès en Europe, notamment dans le domaine forestier. Cette tendance s'explique grâce à la miniaturisation et la réduction des coûts des récepteurs GPS, des systèmes de navigation inertielle, des ordinateurs, et surtout des capteurs de télédétection⁷⁴. Ces nouvelles plateformes ont de nombreuses applications permettant d'appuyer le travail du forestier. En effet, celui-ci peut s'avérer chronophage lorsque les expérimentations requièrent des relevés de données fréquents⁷⁵ ou complexe dans certaines situations (ex. mesure des hauteurs en peuplement dense).

Aujourd'hui, les drones représentent une réelle opportunité pour surmonter ces difficultés et présentent un réel intérêt comme outil d'appui au monde forestier. Le drone peut donner accès à des informations essentielles, comme la hauteur, la localisation et le nombre d'arbres, la densité (nombre de pieds à l'hectare) et le volume⁷⁶. Dans le contexte de l'augmentation des dépérissements forestiers²⁶, les drones constituent également une aide précieuse pour la surveillance de la santé des forêts, permettant de détecter des arbres affectés par un agent pathogène⁷⁷ ou encore d'évaluer la régénération des forêts après une perturbation comme le feu⁷⁸.

Un autre avantage du drone est qu'il permet d'acquérir un nombre important de photos superposées et géoréférencées, qui sont ensuite traitées par des logiciels de photogrammétrie permettant de reconnaître les caractéristiques communes de ces photos afin d'aboutir à un nuage de points 3D détaillé de la surface de la canopée. Cet outil offre donc la possibilité de quantifier la compétition des arbres à l'échelle individuelle⁷⁹ en employant de nouveaux indices, mais également en fournissant les données nécessaires au calcul des indices classiquement utilisés dans la littérature. Cependant, jusqu'à présent, peu d'études ont utilisé le drone pour caractériser la compétition^{79,80} et comparer les indices obtenus aux indices classiques (inventaire terrain)⁷⁹.

2. DÉFINITION DES OBJECTIFS DU TRAVAIL

Les objectifs de ce travail sont multiples et se répartissent en deux grands axes.

- Caractériser la compétition à l'échelle de l'arbre via des approches classiques issues d'inventaire forestier au sol mais aussi par l'utilisation de produits issus du drone :
 - déterminer quelles sont les meilleures approches qui pourront être utilisées dans les modèles visant à expliquer la performance des individus ;
 - comparer l'approche « drone » à l'approche classique.
- Comparer les performances de différentes provenances de deux espèces de pins méditerranéens (*P. halepensis* et *P. brutia*) en termes de survie, circonférence, hauteur, rectitude du tronc, branchaison et croissance :
 - déterminer quelles sont les meilleures provenances pour chacune des variables citées ;
 - évaluer l'impact de la compétition sur chacune de ces variables.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Site d'étude et dispositif expérimental

La plantation expérimentale se situe à Ceyreste (43°13'46" N 5°40'49" E ; Figure 9) en France, en région Sud et plus particulièrement dans le département des Bouches-du-Rhône. Elle occupe une

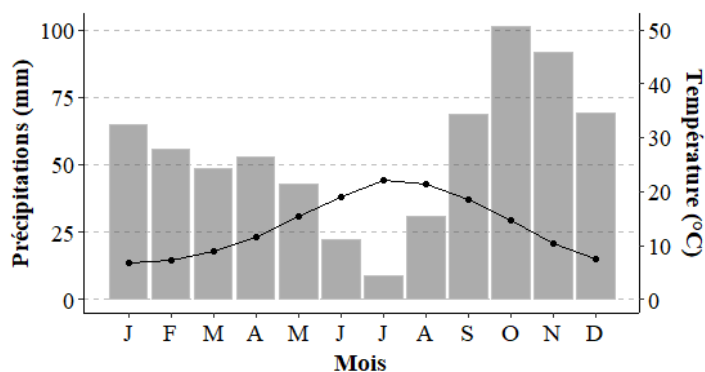


Figure 8. Diagramme ombrothermique de Ceyreste. Les données climatiques sont issues du modèle *SAFRAN* corrigé à partir des données de la station météorologique de Fontblanche, située à 2 km à vol d'oiseau, par une méthode de correction multivariée.

surface de 1,5 ha et se trouve à une altitude de 460 m au-dessus du niveau de la mer. Les précipitations et températures annuelles moyennes sont respectivement de 656 mm et 13,6 °C, avec une sécheresse estivale marquée (moyenne 1959 - 2020, Figure 8). La roche-mère correspond à du grès du Baguier et le sous-étage est principalement constitué de chênes (*Quercus ilex* L. et *Quercus coccifera* L.) et d'arbustes méditerranéens (ex. *Arbutus unedo* L.).

La plantation est constituée des deux espèces *P. halepensis* et *P. brutia*, comportant respectivement 12 et 13 provenances (Tableau 1). A l'état initial, chaque provenance comportait 120 individus sauf pour la provenance Gemenos pour laquelle ce nombre s'élevait à 72. Les individus ont été répartis aléatoirement dans six blocs, chaque bloc contenant 20 individus par provenance et 12 pour Gemenos (Annexe 4).

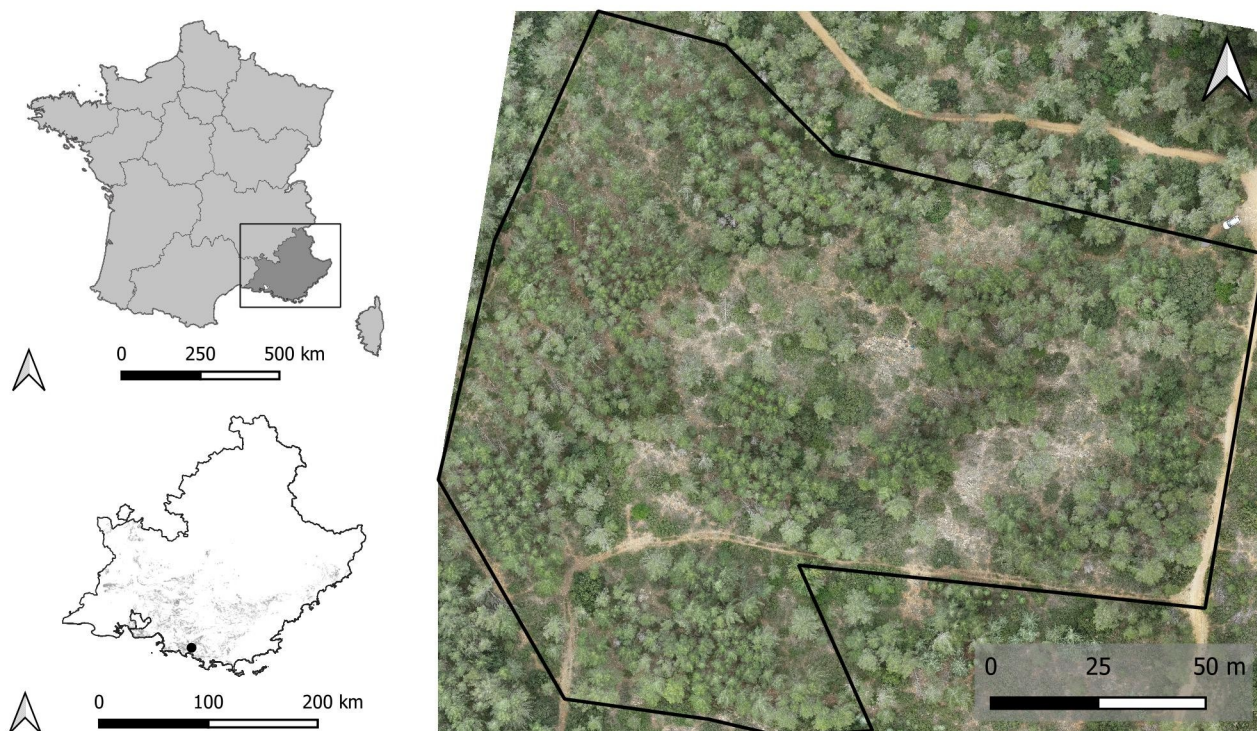


Figure 9. Localisation de la plantation expérimentale. La partie foncée de la carte en haut à gauche correspond à la région Sud ; la carte en bas à gauche représente la distribution du pin d'Alep dans cette région. La carte de droite délimite la plantation sur l'orthophoto réalisée avec le drone. Sources : IGN France.

3.2. Collecte des données

3.2.1. Base de données disponible

A la suite de la plantation en 1976, de nombreuses données ont été prélevées sur le terrain en 1983, 1988, 1995-6 et 2021 et ont été rassemblées dans une base de données contenant, pour chaque arbre :

- l'identifiant ;
- la circonférence à 1,3 m de hauteur pour les années 1996 et 2021 (mm) ;
- une note de survie (1 : vivant ; 0 : mort) pour les années 1983, 1988, 1995 et 2021 ;
- la hauteur pour les années 1983, 1988 et 1996 (cm) ;
- une note de présence/absence de la chenille processionnaire pour l'année 1984 ;
- le nombre de fourches, l'angle d'insertion et la grosseur des branches pour l'année 1996 ;
- l'accroissement moyen des cinq dernières années (2016-2020 ; mm an⁻¹) obtenu à partir de l'analyse des cernes (carottages effectués en 2021).

Tableau 1. Liste des provenances de la plantation de Ceyreste avec leur pays d'origine, nom et diminutif.

Espèce	Pays	Provenance	Diminutif
<i>P. halepensis</i>	Grèce	Elea	ELEA
		Chalkidique	CHAL
	Tunisie	Sakiet Sidiyoussef	SYOU
	Maroc	Zaouia Ifrane	IFRA
		Ouardane Boucksane	BOUK
	Espagne	Soportujar	SOPO
		Cehegin	CEHE
		Serra	SERR
		Tarrasa	TARA
	France	Gemenos	GEME
	Italie	Otricoli	OTRI
		Vico del gargano	VIGA
	<i>P. brutia</i>	Grèce	Chania
Lassithiou			LASS
Alexandropolis			ALEX
Turquie		Marmaris	MARM
		Isparta	ISPA
		Düzlerçani	DUZL
		Pamuçak	PAMU
		Bozburun	BOZB
		Bakara	BAKA
		Silifke	SILI
		Camgölü	CAMG
		Baspinar	BASP
		Kissildag	KISI

3.2.2. Collecte des images à très haute résolution

En mars 2022, un survol de la plantation a été effectué avec deux drones *PHANTOM 4*, l'un équipé d'une caméra multispectrale et l'autre d'une caméra dans le spectre visible dans le but de collecter des images à très haute résolution. Les caractéristiques du plan de vol sont reprises dans le tableau 2. L'acquisition des images a été effectuée sur deux jours par trois personnes dont moi-même.

L'ensemble des images a été traité dans le logiciel de photogrammétrie *Metashape* (*Agisoft Metashape Professional* version 1.8.3) afin d'obtenir des orthomosaïques dans le visible et l'infrarouge. Trois produits dérivant du drone ont été utilisés dans ce travail : le modèle numérique de hauteur (MNH), un indice de végétation, le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) et l'orthomosaïque dans le spectre visible. Ces trois produits ont une résolution de respectivement 7,09 cm, 3,49 cm et 1,78 cm.

Le MNH provient de la soustraction du modèle numérique de surface (MNS) construit avec le drone par le modèle numérique de terrain (MNT) de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) dont la résolution est de 1 m (*RGE ALTI* ® 1 m). Le MNH a été employé dans un des indices de compétition (voir 3.3.2.1). L'orthomosaïque a été employée pour la récolte des données sur le terrain, notamment pour spatialiser les arbres manuellement en digitalisant un point à l'emplacement du centre du houppier. La couche NDVI a été utilisée pour mettre en place un indice quantifiant la compétition individuelle des arbres (voir 3.3.2.2).

Tableau 2. Caractéristiques du plan de vol de la plantation de Ceyreste.

	Drone multispectral	Drone RVB
Nombre de vols	1	1
Altitude de vol	65 m	65 m
Superposition latérale	78 %	78 %
Superposition frontale	88 %	88 %
Nombre de photos collectées	797	607

3.2.3. Données relatives aux caractéristiques de forme et aux défauts

Le protocole détaillé ayant servi aux relevés des données de rectitude, diamètre et angle des branches et défauts se trouve à l'annexe 1.

- La **rectitude du tronc** a été évaluée sur une échelle allant de un correspondant à très droit à cinq pour très sinueux (Tableau 3 ; Figure 10).
- L'**angle d'insertion des branches** a été évalué sur une échelle allant de zéro correspondant à un angle supérieur à 90° à trois pour un angle de 30°. Une note intermédiaire a été attribuée pour les angles compris entre deux notes de l'échelle (Tableau 3).
- L'évaluation du **diamètre des branches**, exprimé en centimètres, s'effectue à l'aide de cinq catégories : petite branche pour un diamètre moyen estimé compris entre 0 et 2 cm, moyenne pour un diamètre moyen estimé compris entre 2 et 4 cm, grosse pour un diamètre moyen

estimé compris entre 4 et 6 cm et enfin très grosse pour un diamètre de branches estimé supérieur à 6 cm (Tableau 3).

- **Les défauts** : pour chaque arbre du dispositif, le nombre de jumelles, baïonnettes et fourches a été repris selon la définition établie dans le protocole à l'annexe 1 (Figure 10).

En termes de qualité du bois, la note de un est considérée comme la meilleure, que ce soit pour le diamètre des branches (petites branches), l'angle des branches (angle plat) ou la rectitude (tronc très droit).

Tableau 3. Méthode de notation employée pour la rectitude du tronc, le diamètre et l'angle des branches.

Note	Rectitude du tronc	Diamètre des branches	Angle des branches
0	—	—	Angle de branche > 90°
1	Très droit	Petite branche (0-2 cm)	Branches horizontales Angle de 90°
1,5	Entre très droit et droit	—	Angle de branche entre 60° et 90°
2	Droit	Moyenne branche (2-4 cm)	Angle de branche de 60°
2,5	Entre droit et moyen	—	Angle entre 30° et 60°
3	Moyen	Grosse branche (4-6 cm)	Angle de branche de 30°
3,5	Entre moyen et sinueux	—	—
4	Sinueux	Très grosse branche (> 6 cm)	—
4,5	Entre sinueux et très sinueux	—	—
5	Très sinueux	—	—



Figure 10. Exemples d'arbres avec une note de rectitude de un (très droit ; a), une note de cinq (très sinueux ; b), un défaut de type jumelle (c) et un défaut de type fourche (d).

3.2.4. Données relatives à la compétition

Les données relatives à la compétition ont été relevées en mars 2022 pour tous les pins appartenant au dispositif expérimental ainsi que ceux issus de la régénération naturelle accompagnatrice. Cette dernière a été prise en compte car elle constitue une source de compétition pour les pins appartenant au dispositif même si cela ne représente qu'une dizaine d'individus.

- La **hauteur totale** a été mesurée à l'aide d'un vertex.
- La **longueur du houppier** : la hauteur d'insertion de la première branche vivante a également été mesurée au vertex. Lorsque le développement du houppier était irrégulier, une moyenne a été effectuée.
- La **circonférence** des pins plantés a été mesurée à 1,3 m de hauteur en juin 2021 ; celle des pins issus de la régénération naturelle a été mesurée en 2022.
- Le **positionnement des arbres** : les arbres ont été géolocalisés sur le terrain en s'aidant de l'orthophoto réalisée avec le drone, implémentée dans un projet sur l'application *Qfield* et embarquée dans une tablette. L'observateur se déplace d'arbre en arbre, identifie le houppier de chaque arbre sur l'orthophoto et place un point sur celle-ci en indiquant l'identifiant de l'individu au centre du houppier lorsque ce dernier est visible. Si ce n'était pas le cas (arbres dominés, zones où les houppiers s'enchevêtrent), le point est placé en estimant visuellement sa distance aux arbres précédemment placés et aux repères visuels (rochers, arbustes...).

La récolte des données a été réalisé en six jours de terrain par deux équipes de deux personnes.

3.3. Caractérisation de la compétition à l'échelle de l'arbre

3.3.1. Sélection des indices de compétition

Les indices présentés dans le tableau 4 ont été sélectionnés car ce sont les plus couramment utilisés dans la littérature. Ils permettent d'utiliser différentes informations telles que la hauteur, circonférence, longueur de houppier et position exacte des individus, mais également d'explorer les deux modes de compétition, symétrique et asymétrique (Figure 11). Les deux derniers indices ont été développés à partir des produits du drone ; le détail de leur calcul est expliqué à la section 3.3.2.

Tableau 4. Indices de compétition utilisés et leurs caractéristiques. AIV : angles d'interception verticaux ; AIH : angles d'interception horizontaux ; BAL : *basal area of larger trees* ; CV : couverture de végétation.

Indice	Équation	Distance dépendant	Taille dépendant	Symétrique/asymétrique	Référence
HEG	$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n(R)} \frac{C_j}{C_i} \frac{1}{D_{ij}}$	Oui	Oui	S	Hegyí (1974) ⁸¹
AIV	$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ H_j > H_i}}^{n(R)} \arctan\left(\frac{H_j - H_i}{D_{ij}}\right)$	Oui	Oui	A	Pukkala et Kolström (1987) ⁸²
AIH	$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n(R)} 2 \cdot \arctan\left(\frac{C_j}{2 \cdot \pi \cdot D_{ij}}\right)$	Oui	Oui	S	Pukkala et Kolström (1987) ⁸²
BAL	$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ C_j > C_i}}^{n(R)} \frac{C_j^2}{4 \pi}$	Non	Oui	A/S	Wykoff et al. (1982) ⁸³
RHV	$\frac{(H_i - HBH_i)}{H_i}$	Non	Oui	-	Prevosto (2005) ⁶¹
MNH	$n_R - n_h$	Non	Oui	A	Inspiré de Vanderwel et al. (2020) ⁷⁹
CV	$m_R - m_h$	Non	Non	-	-

C : circonférence à 1,3 m de hauteur (mm) ; i : indice relatif à l'arbre sujet ; j : indice relatif aux compétiteurs ; H : hauteur (m) ; D_{ij} : distance séparant l'arbre sujet du compétiteur ; R : rayon de prise en compte de la compétition (m) ; HBH : hauteur de la première branche vivante. Pour les indices MNH et CV, se rapporter à la section 3.3.2.

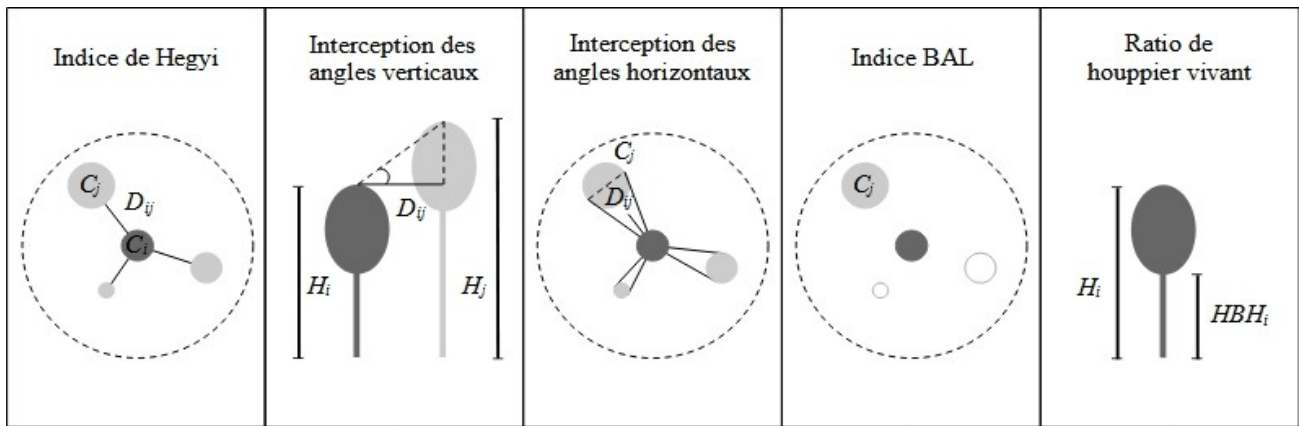


Figure 11. Illustrations des indices de compétition sélectionnés dans la littérature. Le gris clair correspond aux compétiteurs et le gris foncé à l’arbre sujet. Adapté de Prevosto⁶¹.

3.3.2. Les indices de compétition développés à partir des produits du drone

3.3.2.1. Indice basé sur le modèle numérique de hauteur (MNH)

Détermination des hauteurs à partir du modèle numérique de hauteur

La hauteur des arbres est déduite du MNH avec la fonction *extract* du package *raster* (version 3.5-2)⁸⁴ qui permet d’obtenir le maximum local de hauteur au sein d’un tampon circulaire de rayon r centré sur chaque arbre. Le rayon r où s’effectue la recherche de la hauteur maximale a été choisi de manière à maximiser la corrélation entre les hauteurs mesurées au vertex et celles obtenues par la fonction *extract* en le faisant varier de 0,1 m à 0,6 m par pas de 0,1 m.

Sélection des arbres pour le calcul des indices MNH et CV

Certains maxima locaux présentent des erreurs importantes sur la valeur de hauteur si l’on considère le vertex comme la référence (Figure 12). Ces erreurs amènent à des valeurs d’indices de compétition erronées, ce pourquoi une sélection des arbres doit être effectuée. Le critère de sélection fait intervenir deux bornes correspondant à la valeur de biais systémique avec une tolérance d’erreur relative de 10 %.

La valeur du biais a été déterminée par itérations. Un premier modèle m_1 a été ajusté, correspondant à la droite $y = x$. Les points situés entre les droites $y = x - 1$ ($d_{min,1}$) et $y = x + 1$ ($d_{max,1}$) ont été sélectionnés pour ajuster un deuxième modèle m_2 de forme $y = x + b_2$ (Figure 12). A chaque itération i , le modèle m_i correspondant a été ajusté et les points situés entre les droites $d_{min,i}$ ($y = x + b_i - 1$) et $d_{max,i}$ ($y = x + b_i + 1$) ont été sélectionnés. Après n itérations, l’ordonnée à l’origine b_n du modèle se stabilise à la valeur du biais. L’indice a été calculé pour les arbres situés entre les deux bornes obtenues, c’est-à-dire 887 arbres.

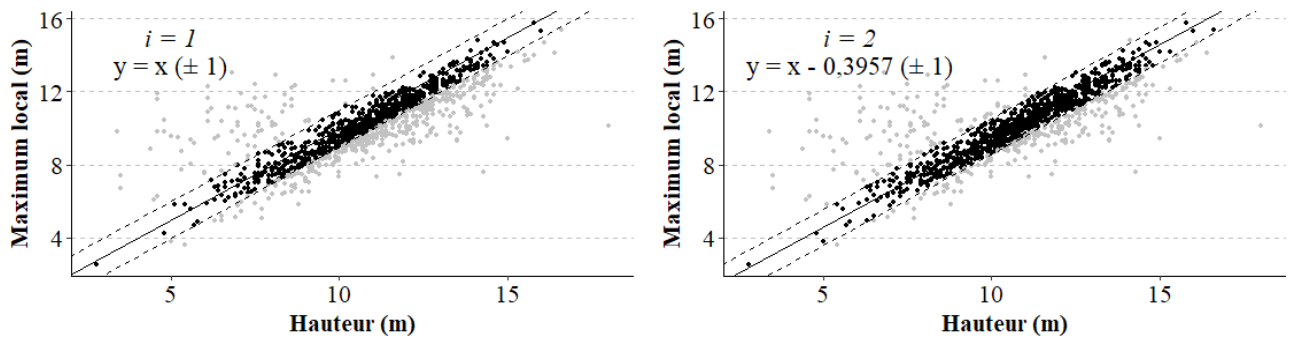


Figure 12. Illustration de la sélection des arbres. Le graphique de gauche correspond à la première itération et celui de droite à la deuxième itération. Les points gris correspondent aux arbres supprimés et les points noirs aux arbres conservés.

Ajustement d'un modèle de prédiction du rayon du houppier des arbres

L'indice nécessite, pour chaque arbre, la définition de deux zones circulaires correspondant, d'une part, à la zone de compétition de rayon R et, d'autre part, d'une zone représentative du houppier de l'arbre, les deux zones étant centrées sur le point géolocalisant l'arbre.

Le rayon du houppier a été obtenu grâce à une relation allométrique construite pour les deux espèces. Pour chacune, 80 individus ont été tirés aléatoirement parmi ceux sélectionnés précédemment. Leur houppier a été délimité manuellement sur Qgis 3.16 à partir de l'orthophoto lorsque cela était possible (Figure 13a) ; le rayon a été calculé sur base de la surface du polygone, en considérant la forme du houppier comme circulaire (Figure 13b). Pour chaque espèce, le modèle linéaire suivant a été ajusté et simplifié par procédure *stepwise* sur base de la valeur p (seuil de 5 %) :

$$\text{rayon}_{\text{houppier}} \sim \text{long}_{\text{houppier}} + \text{circonférence} + \text{hauteur} + \text{HEG} + \text{BAL}$$

Calcul de l'indice

L'indice est calculé de la manière suivante (Figure 13c) :

$$MNH = n_R - n_h$$

où n_R est le nombre de pixels dont la valeur de hauteur est plus grande que le maximum local trouvé pour l'arbre au sein de la zone de compétition de rayon R ;

n_h est le nombre de pixels dont la valeur de hauteur est plus grande que le maximum local trouvé pour l'arbre au sein de la zone correspondant au houppier de l'arbre (prédit).

Cet indice est fort semblable à ceux de la littérature, en particulier l'AIV car il fait une sélection sur les compétiteurs et utilise l'information de hauteur. L'indice MNH permet d'obtenir le nombre de pixels plus grands (compétiteurs) entourant l'arbre sujet.

3.3.2.2. Indice CV basé sur le NDVI

Ce dernier indice est construit sur base de la couche NDVI à partir de l'information donnée par les canaux rouge et proche infrarouge du drone. L'indice correspond au nombre de pixels de végétation entourant l'arbre dans un rayon donné à partir de son houppier.

$$NDVI = (PIR - Ro) / (PIR + Ro)$$

où *PIR* correspond au proche infrarouge et *Ro* au rouge.

Détermination du seuil de végétation

Une valeur seuil de NDVI doit être définie afin de sélectionner les pixels de végétation uniquement. Dans un premier temps, la fonction *extract* a été utilisée sur les houppiers digitalisés (voir 3.3.2.1 - *Ajustement d'un modèle de prédiction du rayon du houppier des arbres*) afin d'obtenir la distribution des valeurs de NDVI des pixels. Cette distribution inclut des valeurs basses correspondant aux pixels de sol visibles dans le houppier et qui sont à écarter. Une valeur seuil de NDVI de 0,6 permet ainsi de distinguer la végétation des autres types de surfaces (sol et eau) (Figure 13d) ; elle a été fixée visuellement en comparant sur Qgis l'orthomosaïque en arrière plan et le NDVI au seuil de 0,6 à l'avant plan.

Calcul de l'indice

L'indice est calculé de la manière suivante (Figure 13d) :

$$CV = m_R - m_h$$

où m_R est le nombre de pixels de végétation ($NDVI \geq 0,6$) au sein de la zone de compétition de rayon R ;

m_h est le nombre de pixels de végétation ($NDVI \geq 0,6$) au sein de la zone correspondant au houppier de l'arbre (prédit).

Cet indice a pour objectif d'évaluer la quantité de végétation qui entoure l'arbre et la compétition subie qui en résulte.

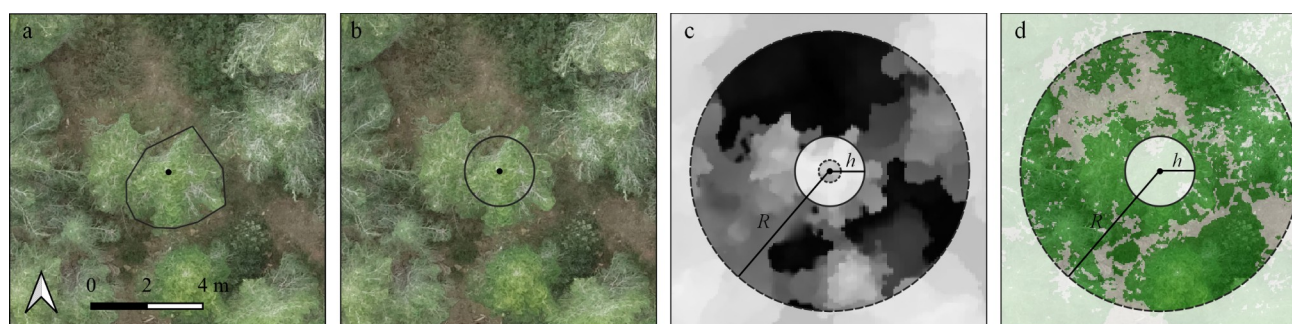


Figure 13. Délimitation manuelle du houppier (a) ; délimitation du houppier sur base du rayon prédit (b) ; calcul de l'indice MNH : le petit cercle en pointillé délimite la zone où le maximum local est extrait, R correspond au rayon de la zone où sont recherchés les pixels compétiteurs et h au rayon du houppier (c) ; calcul de l'indice CV : R correspond au rayon de la zone où l'on reprend les pixels de végétation, en vert (d).

3.3.3. Sélection du rayon de compétition

Le rayon d'influence des compétiteurs - ou zone de compétition - pour un indice donné peut être fixé sur base de la littérature ou obtenu de manière statistique, basé sur la qualité prédictive de l'indice pour une variable biologique donnée. La seconde option, plus rigoureuse, a été adoptée.

Chaque indice de compétition a été calculé en faisant varier le rayon d'influence de 1 à 20 m par pas de 1 m. Ensuite, les coefficients de corrélation ont été calculés pour chaque rayon entre, d'une part, l'indice et l'accroissement moyen de l'arbre des cinq dernières années, et, d'autre part, l'indice et la circonférence mesurée en 2021, représentant la croissance moyenne de l'arbre depuis la plantation (puisque les arbres ont tous le même âge).

Enfin, une fonction logistique liant le coefficient de corrélation r au rayon R utilisé a permis d'obtenir le rayon de la zone d'influence à utiliser pour calculer l'indice de compétition ; ce rayon correspond à 90 % de la valeur de l'asymptote. Cette méthodologie a été répétée pour tous les indices nécessitant de connaître le rayon d'influence, puis un rayon commun a été sélectionné. L'identification des compétiteurs au sein d'un rayon donné a nécessité l'utilisation du package *spdep* (version 1.2-2)⁸⁵ pour les indices HEG, AIV, AIH et BAL.

3.4. Comparaison des performances des provenances

Afin de comparer les deux espèces de pins et leurs provenances sur base de la rectitude, survie, circonférence, hauteur et défauts, des modèles linéaires à effets mixtes ont été ajustés (Tableau 5) avec, pour covariable, l'indice de compétition présentant la plus forte corrélation avec la circonférence et l'accroissement moyen des cinq dernières années. Le bloc a été introduit comme effet aléatoire pour contrôler l'hétérogénéité liée au sol et au microclimat.

Des modèles logistiques ont servi à étudier les variables avec des données binaires et de comptage (Tableau 5). Le modèle de survie n'inclut pas la compétition car cette donnée n'a pas pu être calculée pour les arbres qui sont morts, leur localisation étant imprécise. Pour les modèles à effets mixtes, la méthode d'estimation des paramètres est le maximum de vraisemblance (ML) étant donné que c'est la structure des effets fixes qui change tandis que celle des effets aléatoires reste identique.

Pour chaque variable, les meilleures provenances sont identifiées en effectuant une structuration des moyennes par la méthode de contrastes de Dunnett en utilisant comme provenance de référence celle possédant la meilleure moyenne marginale pour la variable donnée. Les moyennes marginales ont été obtenues via l'utilisation du package *emmeans* (version 1.7.5)⁸⁶; les contrastes ont été calculés avec l'utilisation du même package.

Les modèles linéaires à effets mixtes ont été construits en utilisant le package *nlme* (version 3.1-157)⁸⁷; Les modèles généralisés à effets mixtes ont requis le package *lme4* (version 1.1-28)⁸⁸. La part de la variance expliquée a été évaluée via le R^2 marginal (variance expliquée par les effets fixes seuls) et le R^2 conditionnel (variance expliquée par les effets aléatoires et fixes); ceux-ci ont été calculés en utilisant le package *MuMIn* (version 1.46.0)⁸⁹. L'AIC (*Akaike Information Criterion*) a également été calculé afin de comparer, pour chaque variable, les modèles contenant, d'une part, les provenances et, d'autre part, les espèces. En ce qui concerne la survie, la performance du modèle a été évaluée sur base de l'AUC (*Area Under Curve*), mieux adapté pour les variables binaires, via le package *pROC* (version 1.18.0)⁹⁰.

Les variables relatives à la branchaison, angle et diamètre des branches, n'ont pas pu être analysées de la même manière que les autres variables car leur nombre de classes est insuffisant (Tableau 3). L'analyse a consisté en une simple comparaison des notes moyennes.

L'ensemble des calculs a été effectué via le langage de programmation R 4.1.2⁹¹.

Tableau 5. Modèles ajustés pour la comparaison des provenances et espèces. LME : modèle linéaire à effets mixtes ; GLMER : modèle linéaire généralisé à effets mixtes.

Réponse	Effets fixes	Effet aléatoire	Type	Fonction de lien
Rectitude	Indice de compétition Provenance / espèce	Bloc	LME	Identité
Hauteur	Indice de compétition Provenance / espèce	Bloc	LME	Identité
Circonférence	Indice de compétition Provenance / espèce	Bloc	LME	Identité
Défauts	Indice de compétition Provenance / espèce	Bloc	GLMER	Log
Survie	Provenance / espèce	Bloc	GLMER	Logit

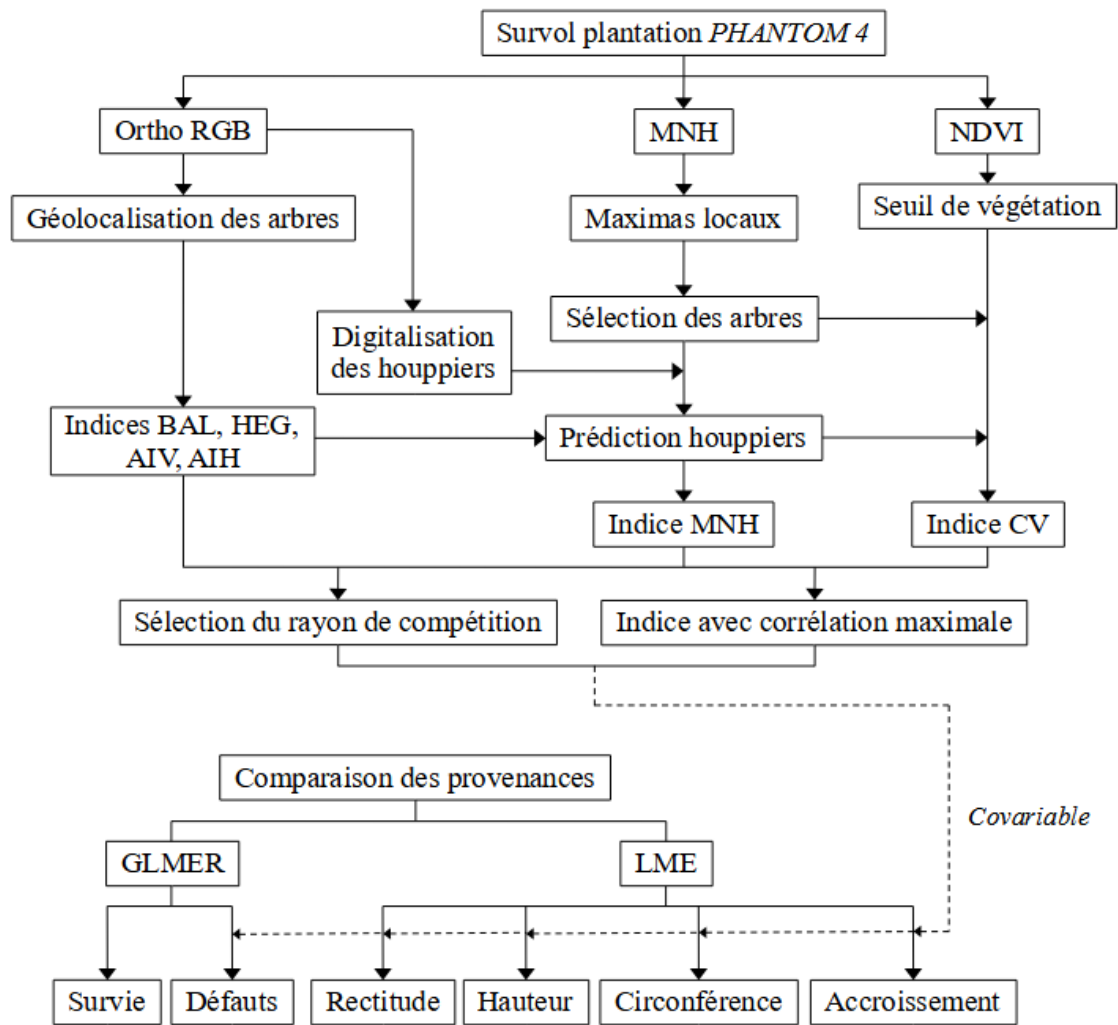


Figure 14. Schéma récapitulatif de la méthodologie appliquée dans ce travail.

4. RÉSULTATS

4.1. Indices de compétition sélectionnés

4.1.1. Indices issus de la littérature et résultats de l'indice MNH

Les coefficients de corrélation entre les indices de compétition et les variables biologiques sont négatifs, et augmentent en valeur absolue avec l'augmentation du rayon de prise en compte des compétiteurs (figures 15 et 16). La saturation est plus rapide lorsque la corrélation est calculée avec la circonférence. L'indice MNH sature plus rapidement que les autres indices, que ce soit en utilisant l'accroissement ou la circonférence.

La plus forte corrélation est obtenue pour l'indice distance-indépendant BAL, que ce soit avec l'accroissement moyen des cinq dernières années ou la circonférence (Tableau 6). Il est suivi de près par les indices distances-dépendants de Hegyi (HEG) et des angles d'interception verticaux (AIV). La plus faible corrélation est obtenue pour l'indice utilisant les angles d'interception horizontaux (AIH). Le ratio de houppier vivant est corrélé positivement à l'accroissement et à la circonférence.

Les rayons de compétition sont plus faibles et les corrélations plus élevées pour la circonférence, excepté pour l'indice du ratio de houppier vivant. L'indice basé sur le MNH montre des valeurs de rayon de compétition plus petits en comparaison des autres indices.

Tableau 6. Rayons de compétition sélectionnés et coefficient de corrélation obtenus avec l'accroissement moyen (2016 - 2020) et la circonférence pour les différents indices de compétition issus de la littérature.

Indice	Accroissement moyen		Circonférence	
	Rayon (m)	Corrélation	Rayon (m)	Corrélation
BAL	13,2	- 0,63	9,0	- 0,75
HEG	9,1	- 0,58	4,5	- 0,61
AIV	7,6	- 0,54	4,4	- 0,60
RHV	—	0,56	—	0,54
MNH	3,6	- 0,52	3,6	- 0,56
AIH	11,7	- 0,23	3,3	- 0,28

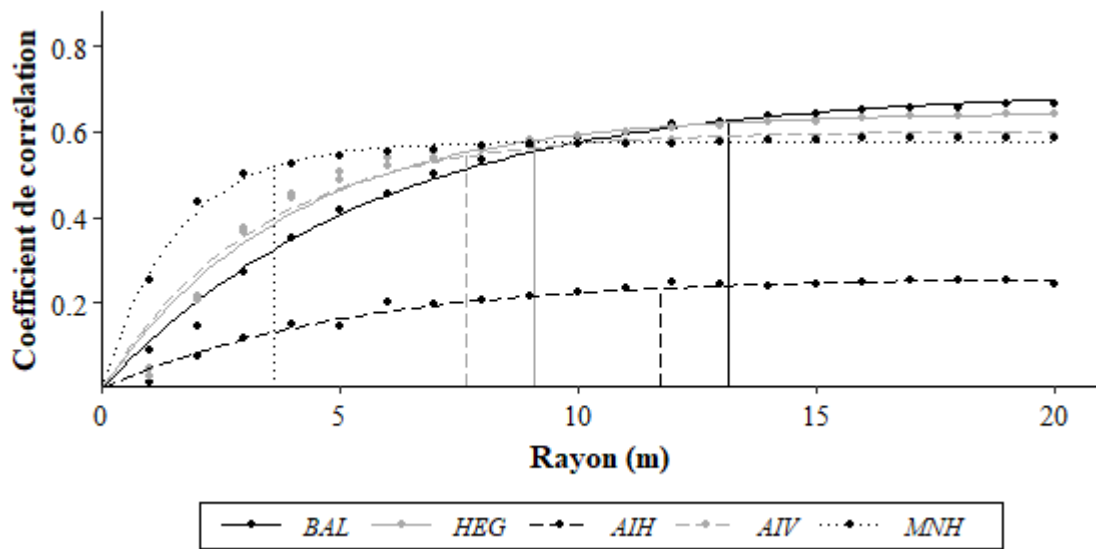


Figure 15. Valeur absolue du coefficient de corrélation entre les différents indices de compétition et l'accroissement moyen (2016 - 2020) en fonction du rayon de compétition. Les traits verticaux correspondent au rayon de compétition sélectionné (90 % de l'asymptote).

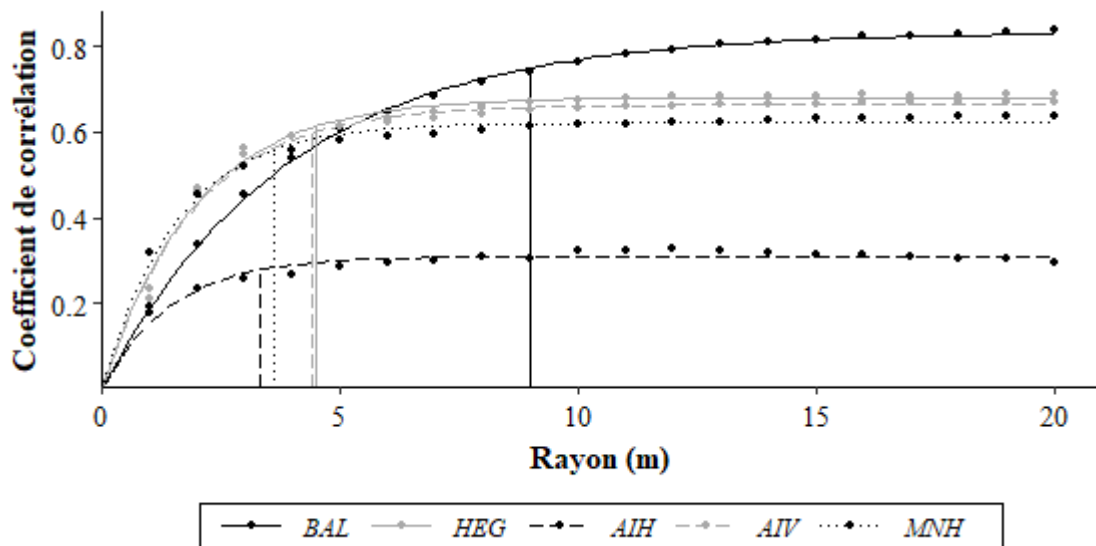


Figure 16. Valeur absolue du coefficient de corrélation entre les différents indices de compétition et la circonférence en fonction du rayon de compétition. Les traits verticaux correspondent au rayon de compétition sélectionné (90 % de l'asymptote).

4.1.2. Indices issus des produits du drone

4.1.2.1. Comparaison des hauteurs vertex et MNH

Le coefficient de corrélation entre la hauteur vertex et celle extraite à partir du MNH est le plus

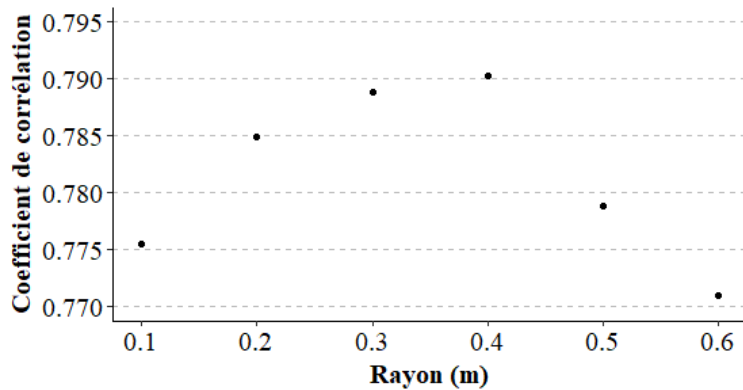


Figure 17. Coefficients de corrélation obtenus entre les hauteurs MNH (maximum local) et celles mesurées au vertex pour un rayon variant de 0,1 à 0,6 m.

élevé lorsque la hauteur de l'arbre est prise dans un rayon de 0,4 m autour du point placé au centre des houppiers lors des mesures terrain (Figure 17), avec une valeur de 0,79.

Les arbres sélectionnés, caractérisés par une erreur relative sur la hauteur égale ou inférieure à 10 % en tenant compte du biais, représentent 80 % du jeu de données. La valeur du biais indique une sous-estimation moyenne des hauteurs drone de 0,734 m par rapport à celles mesurées au vertex (Figure 18).

Les petites classes de hauteur, en particulier la première et la seconde, présentent une erreur relative (en valeur absolue) moyenne et un écart-type élevés par rapport aux autres classes de hauteur (Figure 19).

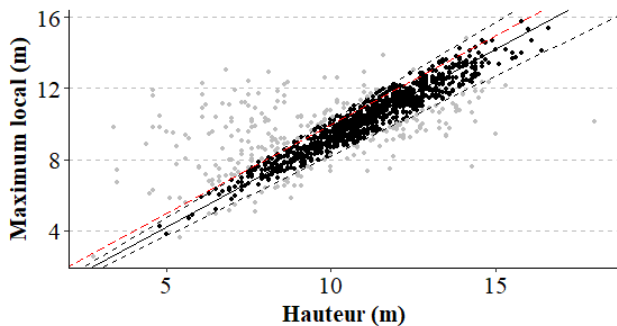


Figure 18. Hauteur MNH (maximum local) en fonction de la hauteur mesurée au vertex. Le trait noir continu correspond au biais et les traits noirs pointillés à une erreur relative de 10 % autour de la valeur de référence corrigée par le biais. Les points noirs correspondent aux arbres sélectionnés et les gris à ceux qui ne le sont pas. Le trait rouge représente la droite $x = y$.

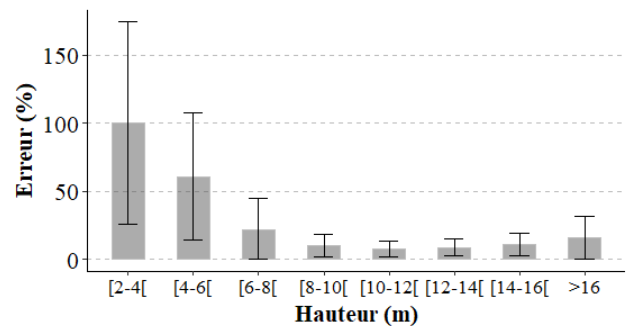


Figure 19. Moyennes de la valeur absolue des erreurs relatives par classe de hauteur accompagnées de l'écart-type. La hauteur de référence est celle mesurée au vertex ; la hauteur mesurée correspond au maximum local extrait du MNH.

4.1.2.2. Modèles de prédiction du rayon du houppier des arbres

Les variables retenues pour le meilleur modèle de prédiction des rayons de houppier du pin d'Alep sont l'indice de Hegyi, la longueur de houppier, la hauteur et la circonférence (Tableau 7). Les variables retenues pour le modèle du pin *brutia* sont au nombre de deux, il s'agit de l'indice de Hegyi et de la circonférence. La compétition contribue négativement au rayon du houppier pour les deux espèces. Il en est de même pour la hauteur dans le modèle du pin d'Alep. Toutes les autres variables contribuent positivement au rayon du houppier.

Tableau 7. Estimation des paramètres, erreurs standards et valeurs p associées aux meilleurs modèles de prédiction du rayon de houppier pour chaque espèce. *circ* : circonférence (mm), *LH* : longueur du houppier (m), *hauteur* : hauteur vertex (m), *HEG* : indice de Hegyi pour un rayon de compétition de 5 m.

$rayon \sim \gamma + \alpha HEG + \beta circ + \varphi LH + \lambda hauteur (R^2 = 0,68 \text{ et } n = 62)$				
	Paramètres	Estimation	Erreurs standards	p
<i>P. halepensis</i>	γ	1,19	0,17	3,22e-09***
	α	-0,057	0,028	0,045*
	β	0,0011	0,0003	0,00171**
	φ	0,082	0,027	0,00367**
	λ	-0,083	0,028	0,00437**
$rayon \sim \gamma + \alpha HEG + \beta circ (R^2 = 0,66 \text{ et } n = 54)$				
	Paramètres	Estimation	Erreurs standards	p
<i>P. brutia</i>	γ	0,97	0,118	7,68e-11***
	α	-0,063	0,01	4,44e-06***
	β	0,0004	0,0001	0,0026**

Codes de significativité : '***' $p \leq 0,001$; '**' $0,001 < p \leq 0,01$; '*' $0,01 < p \leq 0,05$.

Les rayons prédits sont assez proches de la relation « parfaite » $x = y$. Le modèle du pin d'Alep montre davantage d'erreurs sur les rayons prédits en comparaison au pin *brutia* (Figure 20). En effet, la moyenne des erreurs relatives (en valeur absolue) des modèles établis pour les pins d'Alep et *brutia* est de 11,9% (erreur absolue de 0,13 m) et 9,3% (erreur absolue de 0,09 m), respectivement. Plus précisément, 87 % des observations ont une erreur relative absolue inférieure à 20 % pour le pin d'Alep, contre 92 % pour le pin *brutia*.

4.1.2.3. Indice basé sur le NDVI

Les courbes présentant l'impact du rayon de prise en compte des compétiteurs sur les coefficients de corrélation entre l'indice basé sur le NDVI et l'accroissement moyen ou la circonférence ont une tendance exponentielle décroissante (Figure 21), inverse aux autres indices (Figures 15 et 16). Les plus grands coefficients de corrélation sont trouvés pour des rayons de compétition de 1 et 2 m (Figure 21) et sont positifs.

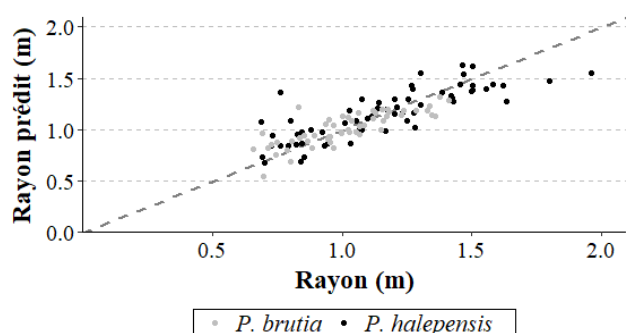


Figure 20. Rayon prédit par le modèle en fonction du rayon obtenu via digitalisation du houppier pour les deux espèces. La ligne en trait pointillé correspond à une relation $x = y$ entre les deux variables.

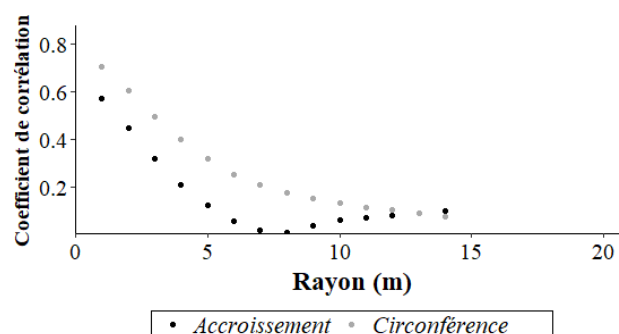


Figure 21. Coefficient de corrélation entre l'indice basé sur le NDVI et les variables biologiques en fonction du rayon de compétition.

4.2. Comparaison des espèces et provenances

4.2.1. Comparaison des performances et des caractéristiques de forme

Les modèles comparant les espèces indiquent une différence hautement significative entre elles et ce, pour toutes les variables (Tableau 8). Le pin *brutia* possède en moyenne des meilleures performances ainsi qu'un tronc plus droit présentant moins de défauts.

Tableau 8. Moyennes marginales obtenues à partir des modèles fonction de l'espèce et de la compétition. Le niveau de significativité est relatif à la différence par rapport à *P. brutia*.

Espèce	Rectitude	Survie	Circonférence	Hauteur	Défauts	Accroiss.
<i>P. brutia</i>	2,77	0,51	717	11,33	0,28	1,73
<i>P. halepensis</i>	3,49****	0,21****	541****	9,33****	0,79****	1,07****

Codes de significativité : '****' $p \leq 0,0001$.

En ce qui concerne la rectitude, la meilleure provenance identifiée est CAMG, de l'espèce *brutia*, avec une moyenne marginale (c'est-à-dire à niveau de compétition identique) de 2,2, correspondant à un tronc droit (Tableau 9). Les provenances non significativement différentes de CAMG sont BAKA, CHAN et PAMU, appartenant toutes à l'espèce *brutia*. Les moyennes marginales les plus élevées (correspondant à une rectitude faible) concernent les provenances VIGA, ELEA et CHAL, appartenant à l'espèce Alep.

Concernant la survie, la provenance présentant les meilleures performances est KISI (*P. brutia*) avec une moyenne marginale de 0,65. Les provenances qui ne sont pas significativement différentes de KISI sont ALEX, BAKA, BASP, BOZB, CAMG, ISPA, MARM, PAMU et SILI. Elles appartiennent toutes à l'espèce *brutia* sauf la dernière. Les provenances les moins performantes sont ELEA, VIGA et BOUK, appartenant à l'espèce Alep. Le taux de survie diminue entre 1983 et 1988 de manière bien plus marquée pour les provenances de l'espèce Alep, potentiellement en lien avec le gel survenu en janvier 1985 (Figure 22). L'épisode de sécheresse de l'année 1989 ne semble pas avoir eu un impact majeur sur le taux de survie des arbres. Entre 1995 et 2022, la survie a diminué, cela est peut-être à mettre en relation avec la période de sécheresse de 2003 - 2007. La provenance locale GEMENOS est la seconde possédant les meilleures performances au sein de son espèce.

Concernant la circonférence, la provenance KISI (*P. brutia*) présente aussi la meilleure performance avec une moyenne marginale de 804 mm. Les provenances qui lui sont équivalentes sont DUZL, MARM et SILI (*P. brutia*). Les provenances les moins performantes sont SYOU, BOUK et VIGA, appartenant toutes à l'espèce Alep.

Concernant la hauteur, la provenance MARM (*P. brutia*) présente les meilleures performances avec une moyenne marginale de 12,17 m. Les provenances qui ne sont pas significativement différentes de MARM sont ALEX, BAKA, KISI, LASS, PAMU, SILI et CHAL, seule la dernière appartenant à l'espèce Alep. Les provenances les moins performantes sont ELEA, VIGA et SYOU, appartenant toutes à l'espèce Alep.

En ce qui concerne les défauts, la meilleure provenance appartient à l'espèce *brutia* et correspond à BASP. Les provenances qui lui sont au moins équivalentes sont ALEX, BOZB, LASS et SERR, seule cette dernière appartenant à l'espèce Alep. Les moins bonnes provenances sont SOPO, IFRA et VIGA (*P. halepensis*).

Enfin, concernant l'accroissement moyen (2016-2020), la meilleure provenance est DUZL, dont la moyenne marginale est de 2,09 mm an⁻¹. Les provenances non significativement différentes de DUZL sont ALEX, BAKA, BASP, BOZB, CAMG, CHAN, ISPA, KISI, MARM, PAMU, LASS, et ELEA, seule cette dernière appartenant à l'espèce Alep. Les provenances les moins performantes sont SYOU, BOUK et TARA (*P. halepensis*).

Tableau 9. Moyennes marginales obtenues à partir des modèles utilisant la provenance et l'indice de compétition BAL (5 m) pour les variables de performances et de forme. Accroiss. : accroissement moyen sur la période 2016 – 2020 ; REF : provenance de référence (correspondant à la meilleure moyenne marginale).

Espèce	Prov.	Rectitude [-]	Survie [-]	Circ [mm]	Hauteur [m]	Défauts [-]	Accroiss. [mm an ⁻¹]
<i>P. brutia</i>	ALEX	3,28 ****	0,49 NS	725*	11,79 NS	0,21 NS	1,60 NS
	BAKA	2,34 NS	0,58 NS	731*	11,84 NS	0,39**	1,74 NS
	BASP	2,97****	0,60 NS	729*	11,11*	0,027 REF	1,66 NS
	BOZB	2,65**	0,58 NS	696****	10,87***	0,095 NS	1,78 NS
	CAMG	2,2 REF	0,56 NS	660****	11,06**	0,29*	1,79 NS
	CHAN	2,38 NS	0,39**	569****	10,20****	0,29*	1,72 NS
	DUZL	3,78****	0,21****	795 NS	10,43**	0,54**	2,09 REF
	ISPA	2,83****	0,52 NS	659****	10,50****	0,40**	1,61 NS
	KISI	2,83****	0,65 REF	804 REF	12,09 NS	0,28*	1,80 NS
	LASS	3,05****	0,33****	694***	11,65 NS	0,067 NS	1,69 NS
	MARM	3,23****	0,52 NS	796 NS	12,17 REF	0,34*	1,93 NS
	PAMU	2,26 NS	0,62 NS	713***	11,42 NS	0,29*	1,62 NS
	SILI	3,00****	0,63 NS	745 NS	11,34 NS	0,50**	1,49**
	<i>P. halepensis</i>	BOUK	3,21****	0,14****	454****	8,62****	0,79****
CEHE		3,14****	0,25****	588****	10,30****	0,60**	1,09****
CHAL		4,27****	0,24****	676***	11,01 NS	0,83****	1,50**
ELEA		4,64****	0,07****	602***	6,83****	0,73***	1,45 NS
GEME		3,48****	0,30***	582****	10,06**	0,63***	1,31****
IFRA		3,10****	0,37***	537****	9,24****	1,12****	1,15****
OTRI		3,59****	0,23****	504****	8,95****	0,86****	1,19 ****
SERR		3,27****	0,19****	559****	9,96*	0,27 NS	0,91****
SOPO		3,56****	0,19****	593****	8,65****	0,89****	0,92****
SYOU		3,83****	0,26****	400****	8,07****	0,80***	0,76****
TARA		2,89***	0,19****	524****	9,85****	0,41*	0,86****
VIGA	4,37****	0,09****	495****	7,58****	1,94****	1,11****	

Codes de significativité : '****' $p \leq 0,0001$; '***' $0,0001 < p \leq 0,001$; '**' $0,001 < p \leq 0,01$; '*' $0,01 < p \leq 0,05$; 'NS' $p > 0,05$.

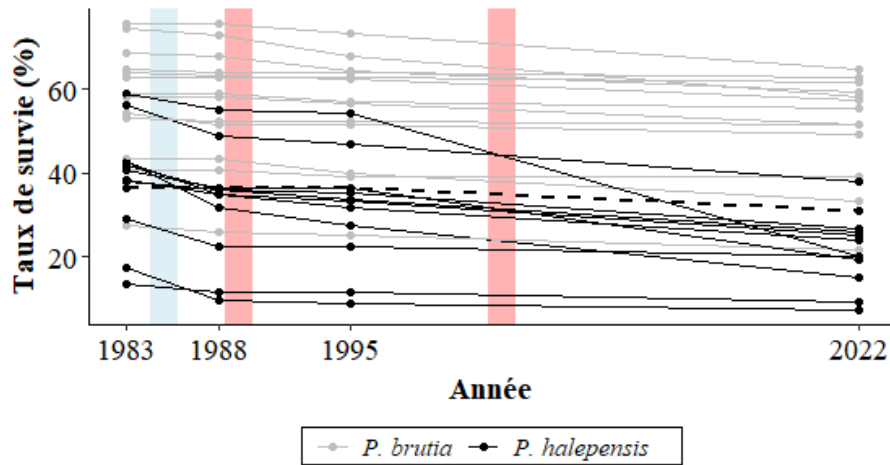


Figure 22. Taux de survie (%) pour les années 1983, 1988, 1995 et 2022. Les bandeaux rouges font référence aux sécheresses de 1989 et 2003, le bandeau bleu indique le gel de janvier 1985. La ligne en trait pointillé correspond à la provenance locale, GEMENOS.

La note moyenne de l'angle des branches se rapproche davantage de un (*i.e.* angle à 90°) pour les provenances de l'espèce *brutia* (Figure 23). En ce qui concerne le diamètre des branches, les provenances des deux espèces ont une note moyenne en-dessous de deux (*i.e.* diamètre entre 2 et 4 cm), excepté ELEA et DUZL (Figure 24).

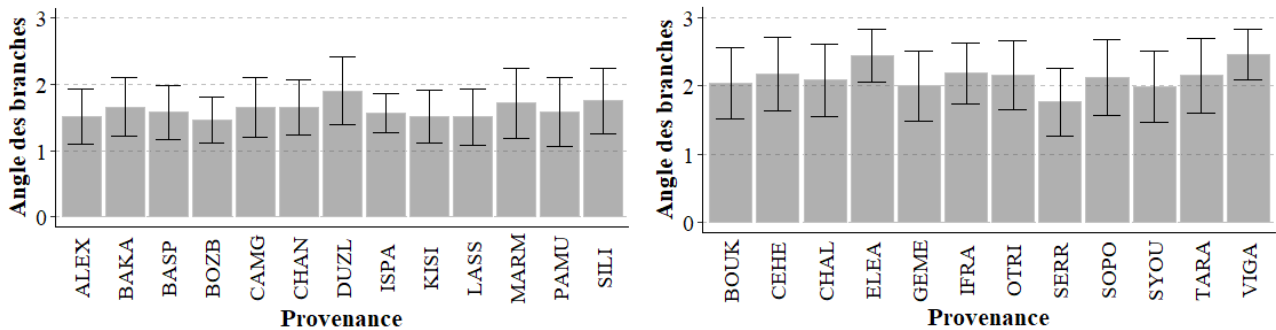


Figure 23. Note moyenne de l'angle des branches et écart-type associé pour les différentes provenances de pin *brutia* (gauche) et d'Alep (droite).

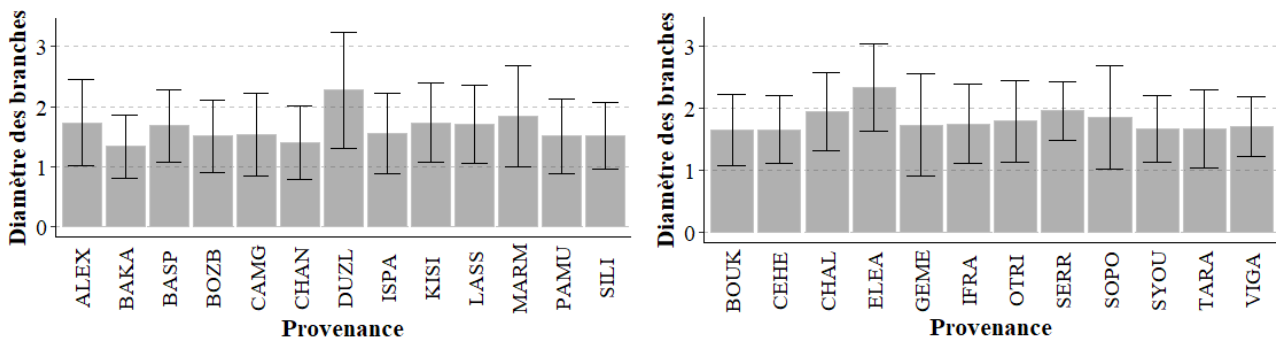


Figure 24. Note moyenne de diamètre des branches et écart-type associé pour les différentes provenances de pin *brutia* (gauche) et d'Alep (droite).

4.2.2. Effet de la compétition sur les performances des arbres et la forme du tronc

Les modèles possèdent un R^2 marginal plus grand lorsque la provenance est considérée en effet fixe plutôt que l'espèce. Ces résultats sont également corroborés par l'AIC dont la valeur est plus faible pour l'effet fixe provenance (Tableau 10). Pour les modèles relatifs aux défauts, la part de variabilité expliquée par les effets fixes (provenance et espèce) est faible (12 % et 3 %, respectivement). Les modèles visant à expliquer l'accroissement moyen des cinq dernières années et la circonférence possèdent des R^2 marginaux élevés (0,61 et 0,54, respectivement). Le modèle de hauteur montre une interaction entre les effets provenance et compétition. La part de variabilité expliquée par le bloc en tant qu'effet aléatoire (différence entre le R^2 conditionnel et le R^2 marginal) est faible, allant de 1 à 5 %.

Tableau 10. Modèles linéaires et modèles linéaires généralisés mixtes pour la comparaison des espèces et des provenances. *Accroiss* : accroissement moyen des cinq dernières années ; *IC* : indice de compétition BAL ($R = 5$ m) ; *sp* : espèce ; *prov* : provenance. Le bloc est introduit en tant qu'effet aléatoire sur l'ordonnée à l'origine.

Modèle	n	R^2 marginal	R^2 conditionnel	AUC	AIC
<i>Rectitude ~ IC + prov</i>	1111	0,37	0,42	-	2277,1
<i>Rectitude ~ IC + sp</i>		0,14	0,18	-	2603,9
<i>Hauteur ~ IC + prov : IC</i>	1111	0,39	0,45	-	4430,8
<i>Hauteur ~ IC + sp : IC</i>		0,26	0,32	-	4508,9
<i>Survie ~ prov</i>	2951	-	-	0,75	3428,7
<i>Survie ~ sp</i>		-	-	0,71	3545,4
<i>Circonférence ~ IC + prov</i>	1113	0,57	0,61	-	14140,2
<i>Circonférence ~ IC + sp</i>		0,49	0,53	-	14314,0
<i>Défauts ~ prov</i>	1112	0,12	0,13	-	1742,4
<i>Défauts ~ sp</i>		0,03	0,04	-	1808,7
<i>Accroiss ~ IC + prov</i>	421	0,49	0,54	-	596,5
<i>Accroiss ~ IC + sp</i>		0,42	0,45	-	615,8

La compétition a un effet négatif sur la rectitude (*i.e.* augmentation de la note de rectitude avec la compétition) (Figure 25), la circonférence (Figure 26), la hauteur (Figure 27) et l'accroissement des cinq dernières années (Figure 28). Les droites correspondant aux provenances de l'espèce *brutia* se situent entre une note de rectitude de deux (droit) et quatre (sinueux) tandis que les provenances de l'espèce *Alep* se situent entre trois (moyen) et cinq (très sinueux). Dans le modèle de hauteur, l'effet

de la compétition est variable selon la provenance (*i.e.* existence d'une interaction entre la provenance et l'indice de compétition ; les droites ont des pentes différentes) (Figure 27).

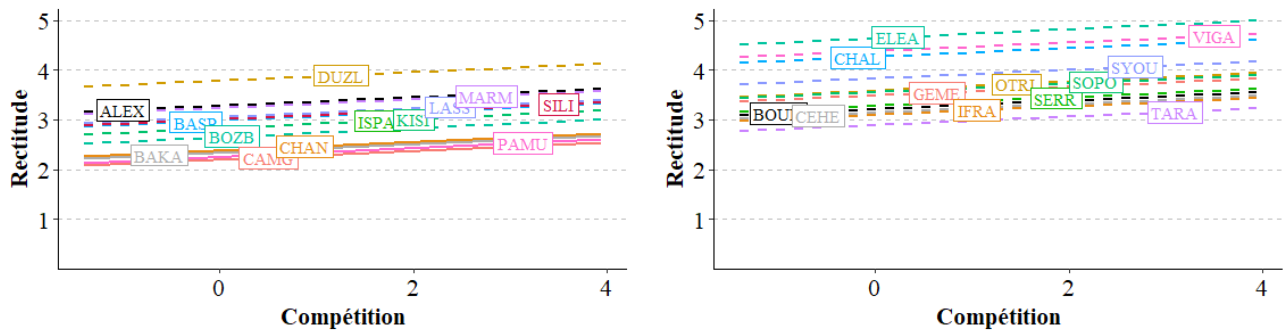


Figure 25. Résultats du modèle linéaire mixte de la rectitude pour le pin *brutia* (gauche) et d'Alep (droite). La compétition correspond à l'indice BAL standardisé ($R = 5$ m).

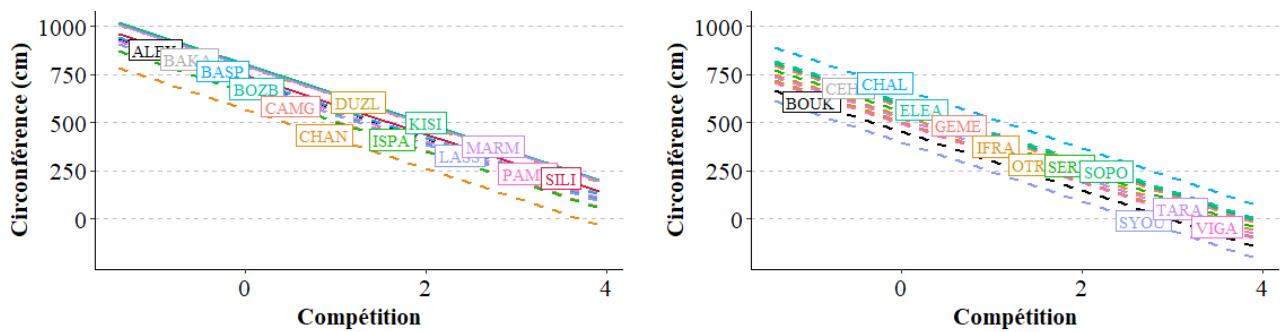


Figure 26. Résultats du modèle linéaire mixte de la circonférence pour le pin *brutia* (gauche) et d'Alep (droite). La compétition correspond à l'indice BAL standardisé ($R = 5$ m).

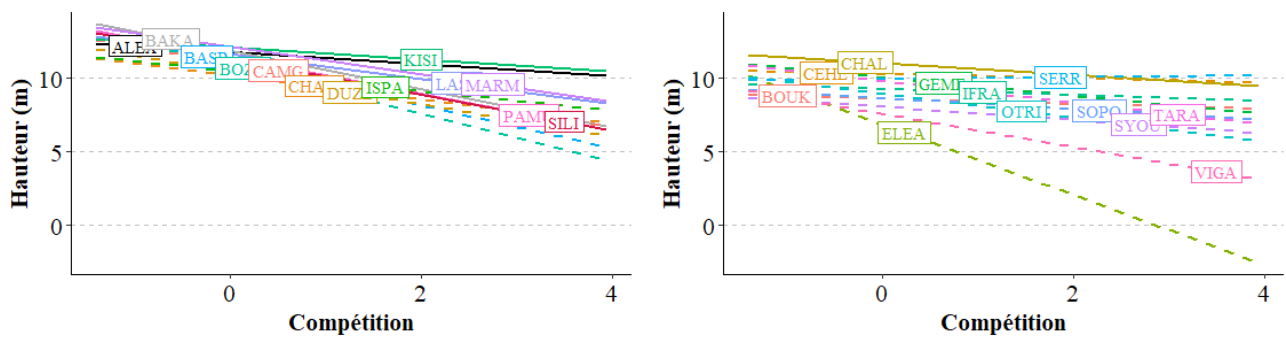


Figure 27. Résultats du modèle linéaire mixte de la hauteur pour le pin *brutia* (gauche) et d'Alep (droite). La compétition correspond à l'indice BAL standardisé ($R = 5$ m).

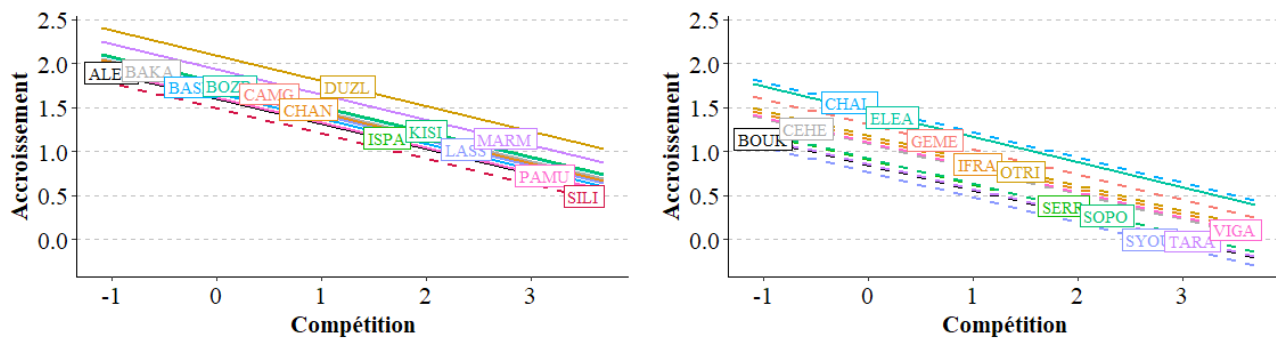


Figure 28. Résultats du modèle linéaire mixte de l'accroissement moyen pour le pin *brutia* (gauche) et d'Alep (droite). La compétition correspond à l'indice BAL standardisé ($R = 5$ m).

5. DISCUSSION

5.1. Les indices de compétition

5.1.1. Indices de compétition issus de la littérature

En regard des valeurs de corrélation entre le niveau de compétition et la croissance des arbres (Tableau 6), le BAL est le meilleur indice, que ce soit avec la circonférence ou l'accroissement moyen. Ce résultat indique que le mode de compétition établi dans la plantation est à la fois symétrique et asymétrique étant donné que l'indice utilise la circonférence et effectue une sélection des compétiteurs (plus gros que l'arbre sujet). Cet indice est suivi de près par celui de Hegyi et des interceptions des angles verticaux. On pourrait s'attendre à de meilleures valeurs de corrélation pour ces indices étant donné qu'ils sont distance-dépendants. En effet, l'hétérogénéité de la densité au sein de la plantation, causée par la forte mortalité des arbres, serait davantage prise en compte par des indices utilisant directement l'information de localisation des arbres. Toutefois, comme dans notre cas, la littérature n'identifie pas une classe d'indice ou un indice qui soit meilleur que les autres⁹². Par conséquent, la performance des indices de compétition dépend du contexte écologique en présence mais également de l'espèce étudiée. L'ordre des meilleurs indices de compétition (BAL, Hegyi puis AIV) est le même que celui obtenu par Helluy et al.⁹³ pour un peuplement naturel géré de pins d'Alep situé à ≈ 70 km de la plantation étudiée. Ceci montre que l'ordre de performance des indices est conservé au sein d'une même espèce pour un contexte écologique et climatique similaire (précipitations et températures annuelles moyennes de respectivement 562 mm et 13.6°C) malgré des différences fortes en termes d'origine et de composition du peuplement (pin d'Alep uniquement).

Les valeurs de corrélation obtenues sont plus grandes pour la circonférence que pour l'accroissement moyen, excepté pour l'indice du rapport de houppier vivant. Ce résultat peut paraître étonnant car, les indices étant principalement valables pour l'année de mesure n (la mortalité des individus et leur taille ne sont pas suivies annuellement), la compétition subie par les individus

devrait mieux refléter l'accroissement des dernières années plutôt que la circonférence qui, elle, retrace la compétition subie depuis la plantation. D'une part, cette différence s'explique notamment par l'effet de l'échantillonnage car la corrélation avec l'accroissement ne reprend que les arbres ayant été carottés, correspondant à un échantillon d'arbres dominants et codominants. D'autre part, l'accroissement moyen (2016 - 2020) reflète la résistance et la capacité de récupération de l'arbre aux sécheresses de 2016 - 2017, masquant l'effet de la compétition ; le diamètre reflète davantage la compétition subie tout au long de la vie de l'arbre.

Les rayons de compétition obtenus semblent élevés en regard de la hauteur des arbres qui ne dépasse pas 18 m. En effet, dans la plupart des articles, un rayon de 5 m est sélectionné pour la recherche des compétiteurs^{61,93}. Il est à noter que les rayons obtenus sont plus grands avec l'accroissement qu'avec la circonférence, ce qui pourrait à nouveau s'expliquer par l'absence des arbres dominés dans le calcul de l'accroissement. Toutefois, l'indice BAL conserve un rayon assez élevé (9 m) même lorsque la corrélation est calculée avec la circonférence de tous les arbres. Cette distance pourrait sembler moins aberrante dans le contexte méditerranéen où la ressource en eau est limitée et impliquerait donc une recherche de l'eau par les racines sur de plus grandes distances. Ceci est également valable pour la plantation étudiée par Helluy et al.⁹³, mais les conditions hydriques y sont meilleures qu'à Ceyreste où le sol est superficiel.

Une autre explication réside dans le fait que les calculs des corrélations avec la circonférence et l'accroissement n'ont pas été réalisés séparément selon l'espèce. Bien qu'elles soient relativement proches en termes d'exigences écologiques, cela n'exclut pas la possibilité d'obtenir des rayons de compétition différents pour ces deux espèces. De plus, lorsque la corrélation est établie entre toutes les valeurs d'accroissements/circonférence et la compétition subie (sans distinction d'espèce), la courbe de saturation englobe les signaux des deux espèces, qui sont assez différents (Figures 29 et 30), menant alors à des valeurs de rayons élevées. Ceci a été vérifié pour l'indice de Hegyi où les rayons obtenus en séparant les deux espèces prennent des valeurs davantage en adéquation avec la littérature (Figure 29). Toutefois, ceci n'est pas vrai pour l'indice BAL où les rayons sont toujours élevés malgré la séparation des espèces (Figure 30).

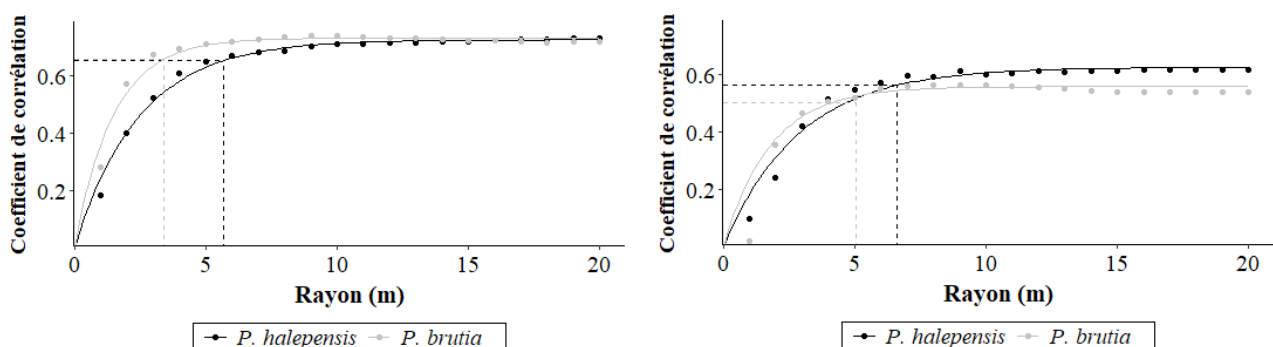


Figure 29. Valeur absolue du coefficient de corrélation entre l'indice HEG et la circonférence (gauche) ou l'accroissement (droite) en fonction du rayon de compétition. Les traits verticaux correspondent au rayon de compétition sélectionné (90 % de l'asymptote).

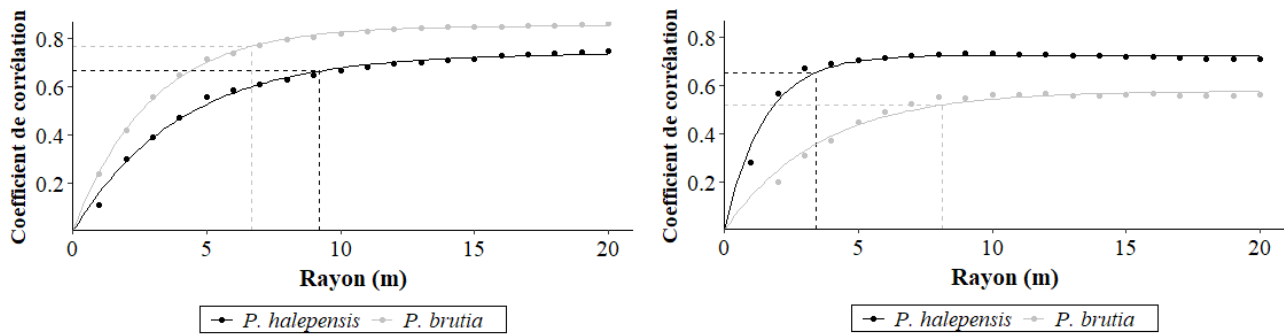


Figure 30. Valeur absolue du coefficient de corrélation entre l'indice BAL et la circonférence (gauche) ou l'accroissement (droite) en fonction du rayon de compétition. Les traits verticaux correspondent au rayon de compétition sélectionné (90 % de l'asymptote).

5.1.2. Indices de compétition issus des produits du drone

5.1.2.1. Indice basé sur le modèle numérique de hauteur (MNH)

L'indice construit sur base du MNH montre une courbe de saturation similaire aux indices de la littérature. Ceci n'est pas étonnant puisqu'il utilise l'information de hauteur des arbres et effectue une sélection des compétiteurs. Toutefois, on peut noter que les rayons de compétition obtenus sont bien plus faibles que pour les autres indices, que ce soit avec la circonférence ou l'accroissement. En effet, la courbe sature plus rapidement que pour les autres indices (Figures 15 et 16). L'indice utilise des pixels et non plus les points au centre des houppiers (un point égal un arbre) ; ceci implique une information plus importante dans les premiers mètres entourant l'arbre comparé aux autres indices (Figure 31). Ces faibles valeurs de rayon peuvent également s'expliquer par le fait que l'indice MNH évalue la compétition pour les ressources lumineuses, qui a lieu en limite de houppier.

L'indice MNH présente des résultats encourageant avec des valeurs de corrélation assez proches de celles de l'indice de Hegyi (Tableau 6). Toutefois, la construction de l'indice nécessite d'enlever les arbres pour lesquels la valeur de hauteur est aberrante (voir 3.3.2.1 - *Sélection des arbres pour le calcul des indices MNH et CV*), représentant ici environ 20 % du jeu de données. Ces valeurs aberrantes de hauteur du MNH proviennent de différentes sources d'erreur, notamment :

- des arbres dominés par leurs voisins et donc invisibles depuis le ciel. Le point servant à géolocaliser l'arbre est placé dans le houppier du voisin, qui est plus grand ;
- les points géolocalisant les arbres ne sont pas placés exactement au centre du houppier et, par conséquent, la recherche du maximum local peut aboutir à une valeur de hauteur erronée ;
- le modèle numérique de hauteur est construit sur base du modèle numérique de surface et du modèle numérique de terrain, qui ont des résolutions différentes ; cela mène à des imprécisions sur les valeurs de hauteur.

Les erreurs ci-dessus sont une première source d'incertitude pour le calcul de l'indice. Il est à noter que l'on considère ici le vertex comme étant la référence (*i.e.* la mesure réelle de la hauteur de

l'arbre). Cette méthode n'est toutefois pas exempte d'erreurs, d'autant plus si l'on considère l'absence d'un apex unique facilement identifiable chez ces espèces de pins. Ganz et al⁹⁴ ont par exemple montré que le vertex présente un biais dans la mesure de hauteur, plus grand que celui pour un drone équipé d'un lidar.

Une seconde source d'incertitude provient de l'utilisation de deux relations allométriques permettant de calculer le rayon des houppiers et intégrant la compétition (voir 3.3.2.1 - *Ajustement d'un modèle de prédiction du rayon du houppier des arbres*). En effet, les moyennes des erreurs relatives (en valeur absolue) des modèles établis pour les espèces *Alep* et *brutia* sont de 11,9 % et 9,4 % , respectivement. Une surestimation du rayon de houppier peut amener à sous-estimer la compétition subie par l'arbre (*i.e.* pixels des voisins repris dans le houppier de l'arbre sujet) (Figure 31). Il est également important de souligner que le houppier a été assimilé à une forme circulaire, ce qui n'est pas forcément juste pour ces espèces, d'autant plus en peuplement où les houppiers, soumis à la compétition, sont irréguliers.

5.1.2.2. Indice basé sur l'indice de végétation NDVI

L'indice basé sur le NDVI, seul indice taille-indépendant, ne présente pas de courbe de saturation comme les autres indices (Figure 21). En effet, la forme de la courbe suit une décroissance exponentielle avec une valeur de corrélation forte dans les premiers mètres entourant le houppier de l'arbre. De plus, les valeurs de corrélation sont positives, alors que la compétition est censée impacter négativement l'accroissement. De tels résultats s'expliquent par le fait que les pixels de

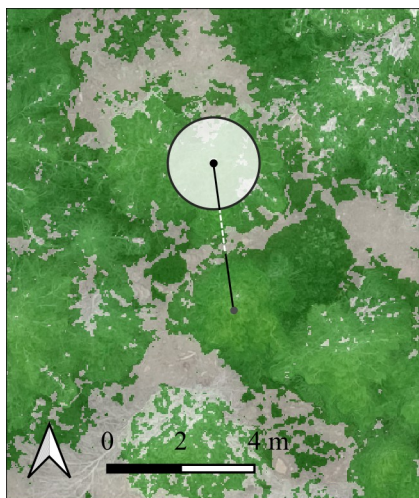


Figure 31. Utilisation du NDVI pour le calcul de l'indice. Le cercle représente le houppier prédit ; le trait pointillé blanc, la distance à laquelle la compétition est prise en compte pour les indices drone ; le trait noir, la distance à laquelle la compétition est prise en compte pour les indices de la littérature.

végétation captés dans les premiers mètres (1 et 2 m) appartiennent au houppier de l'arbre sujet. Ceci est sans doute causé par la sous-estimation des rayons de houppier qui conduit à omettre une partie du houppier de l'arbre (Figure 31).

L'indice présente comme autre faiblesse le choix du seuil à partir duquel la végétation est considérée. Il est déterminé sur simple base visuelle et reprend l'ensemble de la végétation visible depuis le ciel, ce qui signifie que la compétition exercée par un chêne ou un arbousier est considérée équivalente à celle d'un pin. Afin de l'améliorer, les valeurs de NDVI correspondant aux pins pourraient être distinguées de celles des feuillus de sous-étage. De plus, un arbre dominant entouré de voisins plus petits et nombreux aura un niveau de compétition élevé, ceci ne pourrait pas être le cas avec d'autres indices comme le BAL qui effectue une sélection sur les compétiteurs.

Bien que cet indice présente en l'état des résultats contradictoires pour évaluer la compétition, il pourrait être amélioré. Il permet de reprendre indirectement la dimension des compétiteurs : plus un arbre est gros et grand, plus il possède un houppier bien développé et donc, beaucoup de pixels de végétation. Une forte couverture de végétation autour de l'arbre pourrait refléter une

compétition élevée pour les ressources souterraines. L'indice pourrait être rendu à la fois plus simple d'utilisation et plus précis par une détection et une individualisation automatique des houppiers. Cependant, cela semble difficile étant donné leur chevauchement.

5.1.3. Généralités concernant la méthodologie de recherche du rayon de compétition optimal

La méthodologie employée pour la recherche du rayon de compétition est critiquable sur plusieurs points. Tout d'abord, elle utilise un seuil de 90 % de l'asymptote pour lequel le rayon de compétition est défini, ce qui reste assez subjectif. Ensuite, le rayon calculé dépend fortement de la forme de la courbe et donc de la méthodologie employée pour le calcul des indices. En effet, comme précisé plus tôt, la courbe de l'indice MNH sature plus rapidement, ce qui engendre un rayon de compétition plus faible, tandis que les courbes des autres indices, sans séparation des espèces, présentent une augmentation plus lente de la corrélation avec la distance. Cela peut s'expliquer notamment par le fait que les indices sont calculés à partir du point placé au centre du houppier et non à partir de son bord, diminuant ainsi la valeur de R (Figure 31).

5.1.4. Comparaison des indices issus des produits du drone et de la littérature

Les résultats obtenus avec les produits du drone sont plutôt satisfaisants en regard de ceux obtenus avec les indices au sol. Certes, l'outil drone présente des avantages mais aussi des inconvénients qu'il convient de mettre en lumière. L'avantage majeur du drone est qu'il donne la possibilité d'acquérir des images à très haute résolution en un temps assez court (au vu de la surface de la plantation) et ce, de manière répétée. En effet, dans le cadre de ce travail, le survol de plantation a nécessité deux jours de terrain à trois personnes contre six jours à quatre personnes pour l'acquisition des hauteurs et la localisation des arbres depuis le sol. De plus, l'information multispectrale offre la possibilité de définir le type de végétation en présence ainsi que de délimiter les couronnes des arbres via l'utilisation d'indices de végétation. La délimitation des couronnes des arbres peut servir à quantifier la compétition. Le modèle numérique de hauteur permet de s'affranchir des contraintes de terrain, notamment en peuplement où la mesure des hauteurs par le vertex peut s'avérer fastidieuse voire impossible.

Cependant, comme toute technologie, le drone a ses limites. En effet, comme précisé antérieurement, le MNH ne permet pas d'évaluer correctement la hauteur des arbres dominés, invisibles depuis le ciel. Ceci oblige à éliminer des arbres et donc de l'information, ce qui n'est pas le cas des autres indices. Une autre limite du drone réside dans sa dépendance aux conditions météorologiques pour la prise des photos. En effet, même si les conditions nuageuses ne posent pas de problème, contrairement aux systèmes de télédétection par satellite, le drone ne peut voler au-delà d'une certaine vitesse de vent (environ 36 km/h), facteur non négligeable en France méditerranéenne avec la présence du mistral. De même, le vol est préférable à certaines périodes de la journée afin d'éviter la présence d'ombres sur les produits générés. Enfin, le traitement des

images au sein du logiciel de photogrammétrie requiert une mémoire conséquente, de l'ordre de 60 GB pour 200 images, soit environ 180 GB pour l'orthophoto RVB.

Enfin, il serait intéressant de pouvoir s'affranchir de l'utilisation d'un autre indice de compétition pour la détermination du rayon de houppier afin de conserver une approche uniquement basée sur la télédétection. Cela pourrait se faire via une automatisation de la détection des arbres et de leur segmentation. Néanmoins, cela demanderait la mise au point d'une méthodologie assez fastidieuse à mettre en place voire impossible étant donné l'absence d'un unique apex chez ces pins et l'entremêlement des houppiers.

5.2. Comparaison des performances des espèces et provenances

5.2.1. Comparaison des performances et caractéristiques de forme

Cette partie concerne, pour ce qui est de la rectitude, survie et hauteur, la comparaison des résultats actuels, 46 ans après plantation, avec ceux de l'étude de Bariteau et Pommery⁵⁹ menée 12 ans après plantation.

5.2.1.1. La rectitude du tronc

En ce qui concerne la rectitude, les meilleures provenances identifiées en 2022 sont CAMG, PAMU, BAKA et CHAN. Elles proviennent toutes de Turquie sauf la dernière, originaire de Grèce. En 1992, les meilleures provenances, décrites comme ayant une forme très bonne à exceptionnelle, sont PAMU, BAKA et KISI. Elles sont toutes originaires de Turquie. La provenance KISI ne se retrouve pas parmi les meilleures provenances actuelles, sa note moyenne de rectitude est de 2,8 (*i.e.* entre droit et moyen), ce qui est assez acceptable.

5.2.1.2. La survie

Pour ce qui est de la survie, l'étude de 1992 a étudié la mortalité suite à l'épisode de gel de janvier 1985. Les provenances qui en ont le plus souffert sont ELEA (Grèce), BOUK (Maroc), OTRI (Italie), TARA (Grèce) et VIGA (Italie), avec un taux de mortalité de 56 %, 26,8 %, 25,8 %, 25 % et 21,7 %, respectivement. Ceci explique les résultats de 2022 identifiant les provenances les moins performantes comme étant ELEA, BOUK et VIGA. En 2022, les provenances présentant la meilleure survie sont KISI, ALEX, BAKA, BASP, BOZB, CAMG, ISPA, MARM, PAMU et SILI. Elles font partie de celles qui ont très peu souffert de l'épisode de gel de 1985, avec des taux de mortalité faibles en 1992, allant de 0 à 6 %.

5.2.1.3. La hauteur

Concernant la hauteur, les provenances les plus performantes en 2022 sont MARM, ALEX, BAKA, KISI, LASS, PAMU, CHAL et SILI. Ces provenances sont originaires de Turquie, sauf LASS et ALEX qui proviennent de Grèce. En 1992, les meilleures provenances correspondaient à MARM, KISI, ALEX, BAKA, SILI, CHAL, LASS, PAMU, BOZB, ISPA, BASP, CAMG, CEHE, CHAN, DUZL, SERR et IFRA. La provenance MARM conserve son statut de la provenance la plus performante.

5.2.1.4. La branchaison

En ce qui concerne l'angle des branches, le pin *brutia* semble plus intéressant car ses provenances sont caractérisées, en moyenne, par des angles plus plats (*i.e.* note proche de un ; Tableau 3). Pour ce qui est du diamètre des branches, on n'observe pas de différence marquée entre les deux espèces. Notons que ces résultats peuvent être influencés par le faible nombre d'individus représentant certaines provenances et l'hétérogénéité du peuplement (influence de la proximité d'une trouée sur le diamètre des branches).

5.2.1.5. Synthèse

De manière générale, le pin *brutia* semble être plus performant que le pin d'Alep. Ceci est vérifié par la comparaison des provenances, celles du pin d'Alep étant très rarement les plus performantes. La comparaison des résultats actuels avec ceux de 1992 montre que les classements se maintiennent assez bien dans le temps, que ce soit au niveau des performances (hauteur et survie) ou de la rectitude du tronc. Les provenances les moins performantes, tous critères confondus, sont celles qui ont été fortement impactées par le gel de 1985. Les provenances d'altitude de *P. brutia* comme, par exemple, PAMU, ISPA, CHAN et LASS ont été peu impactées par l'action du gel et se retrouvent dans au moins un des classements des provenances les plus performantes.

La provenance la plus prometteuse semble être KISI, originaire de Turquie et appartenant à *P. brutia*. Elle apparaît dans presque tous les classements des meilleures provenances, mis à part pour les défauts et la rectitude, dans lesquels ses valeurs restent correctes. Cette provenance avait été identifiée en 1992 comme résistante au gel et à la sécheresse, caractéristique plus qu'intéressante dans le contexte de changement climatique. Quant à la provenance locale GEME, elle semble ne pas être la mieux adaptée, ses performances moyennes n'étant pas les meilleures au sein de son espèce, que ce soit en termes de survie, de hauteur, de circonférence ou d'accroissement. En effet, au sein de l'espèce *P. halepensis*, les modèles identifient les meilleures provenances comme étant TARA pour la rectitude et les défauts, IFRA pour la survie, CHAL pour la circonférence et la hauteur et ELEA pour l'accroissement. Ce dernier résultat semble étonnant puisque la provenance ELEA est la moins performante globalement mais cela est dû à l'effet d'échantillonnage, qui n'a repris que les arbres dominants et codominants, soit sept individus.

Notons qu'il existe un effet de sélection naturelle des arbres au cours du temps. L'ensemble des analyses peut s'en trouver impacté, seuls les individus les plus performants ayant survécu aux différents épisodes de gel et sécheresse. Même si cet effet concerne toutes les provenances, on peut imaginer que son impact est plus marqué pour celles ayant subi le plus de mortalité, améliorant alors artificiellement leurs performances observées.

La moins bonne performance du pin d'Alep peut s'expliquer par sa plus grande sensibilité au gel mais également par la nature du sol (grès), cette espèce affectionnant les sols calcaires. La plantation n'est donc pas représentative des conditions « optimales » de croissance du pin d'Alep. L'étude présentée ici devrait être répliquée dans des conditions climatiques et édaphiques variées afin de récolter des résultats plus généralisables pour conseiller au mieux les gestionnaires forestiers pour le choix d'espèces.

En dépit des résultats des analyses de performance du pin d'Alep, cette espèce reste intéressante dans le contexte du changement climatique. Elle présente en effet une forte plasticité phénotypique et ce, pour de nombreux traits et dans des conditions climatiques variées⁹⁵⁻⁹⁷. La plasticité phénotypique permet une adaptation rapide aux nouvelles conditions, ce qui est avantageux au vu de la rapidité des changements climatiques. Le pin *brutia* présente également une certaine plasticité phénotypique⁹⁸, en plus de montrer des performances et caractéristiques de forme avantageuses qui pourraient en faire une espèce bien mieux valorisable que le pin d'Alep. Même si la migration assistée n'est pas sans danger, il est important de souligner que le pin *brutia* est très proche du pin d'Alep, certains le considérant d'ailleurs comme une sous-espèce de celui-ci. De plus, le pin *brutia* a déjà été introduit en France sans qu'aucun comportement problématique ne soit rapporté. Néanmoins, une attention particulière doit être portée sur le risque d'hybridation entre ces deux espèces, qui peut survenir de manière naturelle⁹⁹.

5.2.2. Effet de la compétition sur les performances et la rectitude du tronc

5.2.2.1. Discussion générale sur les modèles statistiques

Les modèles linéaires et modèles linéaires généralisés mixtes possèdent une valeur d'AIC plus élevée lorsque l'espèce est considérée en tant qu'effet fixe plutôt que la provenance. De même, la part de variabilité expliquée par les effets fixes (R^2 marginal) est plus faible lorsque l'espèce est considérée. L'effet fixe « provenance » permet de mieux expliquer la variabilité au sein du jeu de données et la qualité du modèle s'en trouve améliorée. Ceci démontre qu'il existe, au sein d'une même espèce, une variabilité expliquée, en partie, par la provenance. En ce qui concerne les modèles de survie, l'AUC prend des valeurs comprises entre 0,7 et 0,8, témoignant de la bonne capacité de discrimination du modèle¹⁰⁰, c'est-à-dire à classer correctement les individus (*i.e.* qu'un arbre mort soit prédit comme étant mort). La part de variabilité expliquée par le bloc en tant qu'effet aléatoire est très faible, traduisant une variabilité réduite entre les blocs et donc peu de variations dans les conditions locales de la plantation.

La compétition a été introduite dans les modèles via l'indice BAL présentant les meilleurs coefficients de corrélation avec l'accroissement et la circonférence. En raison de la manière dont est

calculé cet indice, de nombreux arbres possèdent un indice de compétition de valeur nulle. Leur abondance a un poids important sur l'ajustement des modèles. Il serait intéressant de tester l'intégration d'autres indices de compétition dans les modèles, tels que HEG ou l'AIV pour comparer leur effet avec celui du BAL et déterminer lequel permet d'expliquer au mieux la variabilité du jeu de données et d'augmenter la qualité prédictive du modèle.

5.2.2.2. *La rectitude du tronc*

La compétition impacte négativement la rectitude : plus les arbres subissent de compétition et moins ils sont droits (*i.e.* la note de rectitude augmente avec la compétition ; Figure 25). Ce résultat est étonnant car on peut penser que la compétition exercée par les arbres voisins aide à diriger la croissance de l'arbre et donc à le rendre plus droit^{101,102}. Cette hypothèse est vérifiée lorsque les arbres compétiteurs entourent l'arbre sujet de manière égale, avec des densités de plantation suffisamment élevées pour conduire les arbres à pousser bien droit vers le haut. La plantation de Ceyreste ne semble pas répondre pas à ce critère. D'une part, le taux de mortalité élevé, particulièrement pour *P. halepensis*, produit des ouvertures inégales dans la canopée qui conduisent les arbres à « se tordre » pour chercher la lumière. D'autre part, l'indisponibilité des éléments nutritifs du sol, causée par une forte compétition, peut conduire les arbres à devenir moins droit¹⁰³. Également, la forme tortueuse du pin d'Alep peut être causée par des cassures provoquées par le poids de la neige¹⁵.

5.2.2.3. *La croissance*

La compétition impacte négativement la circonférence, la hauteur ainsi que l'accroissement (2016-2020). Une compétition sévère pour les ressources souterraines ou aériennes limite la croissance de l'arbre, comme cela a déjà été démontré de nombreuses fois^{93,104}. Cependant, la croissance d'un arbre est influencée par d'autres facteurs que la compétition seule. Les événements climatiques, tels que la sécheresse ou le gel, ont un effet non négligeable sur la croissance de l'arbre qu'il serait intéressant de considérer.

5.2.2.4. *Les défauts*

Les modèles visant à expliquer le nombre de défauts présents sur l'arbre n'intègrent pas la compétition, son effet n'étant pas significatif. Les défauts des arbres (jumelles, fourches, baïonnettes) sont souvent d'origine génétique, physiologique ou provoqués par des accidents climatiques tels que le gel, qui engendre la mort du bourgeon apical, obligeant les bourgeons axillaires à prendre le relais. Le pin d'Alep est une espèce particulièrement sensible au gel¹⁰⁵ dont les dégâts peuvent expliquer, en partie, la présence de ces défauts.

6. CONCLUSION

L'indice de compétition qui présente les plus fortes valeurs de corrélation avec l'accroissement et la circonférence est l'indice BAL. Le mode de compétition établi au sein de la plantation est donc à la fois asymétrique et symétrique. Les indices distance-dépendants ne sont pas mieux corrélés aux variables biologiques malgré l'hétérogénéité de la plantation.

Les valeurs de corrélation sont plus grandes pour la circonférence que pour l'accroissement moyen. Ceci peut s'expliquer par l'effet d'échantillonnage, l'accroissement moyen ne reprenant que les arbres dominants et codominants. D'autre part, la circonférence reflète la compétition subie tout au long de la vie de l'arbre tandis que l'accroissement moyen (2016 - 2020) exprime davantage la résistance et la capacité de récupération de l'arbre aux sécheresses de 2016 - 2017.

Les rayons de compétition ont des valeurs élevées en regard de ceux trouvés dans la littérature pour les raisons suivantes :

- le déficit hydrique peut amener les arbres à produire un système racinaire plus développé pour rechercher l'eau ;
- la courbe de saturation reprend le signal des deux espèces confondues. Or, malgré des exigences écologiques similaires, cela n'écarte pas la possibilité de rayons de compétition différents pour chaque espèce ;
- les indices sont calculés à partir du point placé au centre du houppier et non à partir de son bord, les compétiteurs sont donc plus éloignés qu'ils ne le sont en réalité.

L'indice basé sur le MNH présente des résultats encourageants, semblables aux indices choisis dans la littérature. Néanmoins, il nécessiterait d'être amélioré en automatisant la détection des arbres et la segmentation de leur houppier. De plus, l'utilisation d'un drone équipé d'un lidar permettrait d'obtenir une meilleure précision sur les valeurs de hauteur et d'accéder à l'information du sous-bois pour déceler les arbres dominés.

L'indice basé sur le NDVI ne quantifie pas la compétition, les coefficients de corrélation avec la circonférence et l'accroissement étant positifs. Il capte les pixels de végétation appartenant au houppier de l'arbre sujet, expliquant la forte corrélation dans le premier mètre qui l'entoure. Néanmoins, cet indice n'est pas sans potentiel et mériterait d'être amélioré en délimitant précisément le houppier de l'arbre.

La compétition affecte négativement la croissance des arbres mais également leur rectitude dans le cas présent.

Le pin *brutia* est en moyenne plus performant, plus droit et possède moins de défauts que le pin d'Alep. Cette espèce est très prometteuse dans le contexte des changements climatiques car elle est moins sensible au gel et résiste assez bien à la sécheresse. La provenance la plus intéressante de l'essai est KISI, appartenant à l'espèce *brutia*. Elle est présente dans presque tous les classements des meilleures provenances. Le pin d'Alep ne doit toutefois pas être écarté pour les reboisements à venir. Il s'agit d'une des espèces les plus résistantes à la sécheresse et qui présente une forte plasticité phénotypique, donnant la possibilité d'une adaptation rapide. Le pin *brutia* peut être planté là où les risques de gel, auquel *P. halepensis* est plus sensible, sont plus importants.

7. ANNEXES

Annexe 1. Protocole de récolte des données.

0. Généralités

Les différents critères de conformation **sont à noter jusqu'à mi-hauteur de l'individu**, les critères ont été retenus de manière à rester cohérents par rapport à ceux utilisés dans les années '80. Dans un premier temps, ce protocole sera mis en application sur les arbres ayant été carottés durant l'été 2021 (+/- 400 individus) et si le temps nous le permet et que nous le jugeons utile, nous essayerons de l'appliquer à tous les arbres. Ce protocole contient également une partie destinée à la prise de mesures relatives à la caractérisation d'indices de compétition.

1. Évaluation de la rectitude

La rectitude est évaluée sur base de l'ancien classement, des photos de référence relatives à chacun des scores seront annexées au protocole (lors d'une prochaine sortie de terrain) de manière à noter ce critère le plus objectivement possible.

Note	1	2	3	4	5
Rectitude	Très droit	Droit	Moyen	Sinueux	Très sinueux

La rectitude ne peut s'évaluer à partir d'un point fixe au risque d'attribuer un score non représentatif de la rectitude de l'arbre. Il est donc **vivement recommandé de se positionner à différents** endroits pour observer l'arbre dans son ensemble avant de noter ce critère.

Une note intermédiaire peut être attribuée si l'observateur juge qu'un arbre se situe entre 2 scores. Par exemple, l'arbre peut se voir attribuer une note de 1,5.

Les notes sont attribuées au minimum par deux observateurs qui discutent ensuite de leur notation et se mettent d'accord sur la note finale à attribuer.

2. Évaluation de l'angle d'insertion

L'angle d'insertion correspond à l'angle, exprimé en degrés, entre le tronc et l'insertion de la branche. Son évaluation est faite comme suit :

Note	1	2	3	4
Angle	> 90°	90°	60°	30°

Une note intermédiaire peut être attribuée si les observateurs jugent que l'angle d'insertion est intermédiaire à deux scores. Par exemple, un angle estimé à 75° prendra une valeur de 1,5.

3. Évaluation du diamètre des branches




L'évaluation du diamètre (cm) des branches s'effectue avec les cinq catégories suivantes :

Classe	Petite	Moyenne	Grosse	Très grosse
Diamètre (cm)	0 - 2	2 - 4	4 - 6	> 6

Dans le cas où l'arbre présente des diamètres de **branche hétérogènes**, les observateurs devront **considérer les plus grosses** dans la mesure où ce sont elles qui impactent le plus la qualité du bois.

4. Les défauts

Les défauts correspondent au nombre de fourches, baïonnettes et jumelles présentes sur l'individu, les définitions ci-dessous seront appliquées :

Défaut	Description	Schéma
Fourche	Division du fût en deux axes dont le diamètre à la base et la hauteur sont au moins équivalents aux deux tiers l'un de l'autre.	
Jumelle	Division du fût en deux axes au niveau du collet de l'arbre.	
Baïonnette	Déviations de la tige à la suite de la mort du bourgeon terminal, la branche part de la tige principale en formant un angle aigu et son diamètre est au moins égal à la moitié du diamètre de la tige principale.	

5. Matériel nécessaire

- Rapporteur en degrés pour aider visuellement à l'évaluation de l'angle d'insertion des branches
- Pied à coulisse pour aider visuellement à l'évaluation du diamètre des branches
- Vertex pour la mesure des hauteurs et piles

6. Mesure des longueurs de houppier

La compétition est un facteur clé à considérer si l'on veut quantifier de manière appropriée la résilience des individus à la suite d'un évènement extrême. Dans le but de quantifier cette compétition s'exerçant entre les individus, différents indices peuvent être calculés. Ceux-ci sont répartis en deux catégories, les indices dépendants de la distance et ceux qui en sont indépendants. Ces indices permettent de réaliser une mesure indirecte de la compétition au sein d'un peuplement et son faciles d'utilisation. Il se basent généralement sur des mesures de hauteur, longueur de houppier, circonférence, diamètre, ...

Avant d'effectuer les mesures, il faut veiller à ce que le **vertex soit calibré**. Ensuite, la hauteur et longueur de **houppier peuvent être mesurés, si le houppier est plus développé d'un côté que de l'autre, alors une moyenne sera calculée**. La mesure de hauteur et longueur peut être répétée (2 fois au minimum) pour limiter les erreurs.

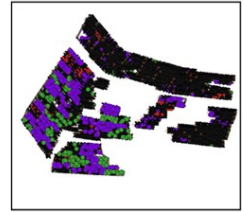
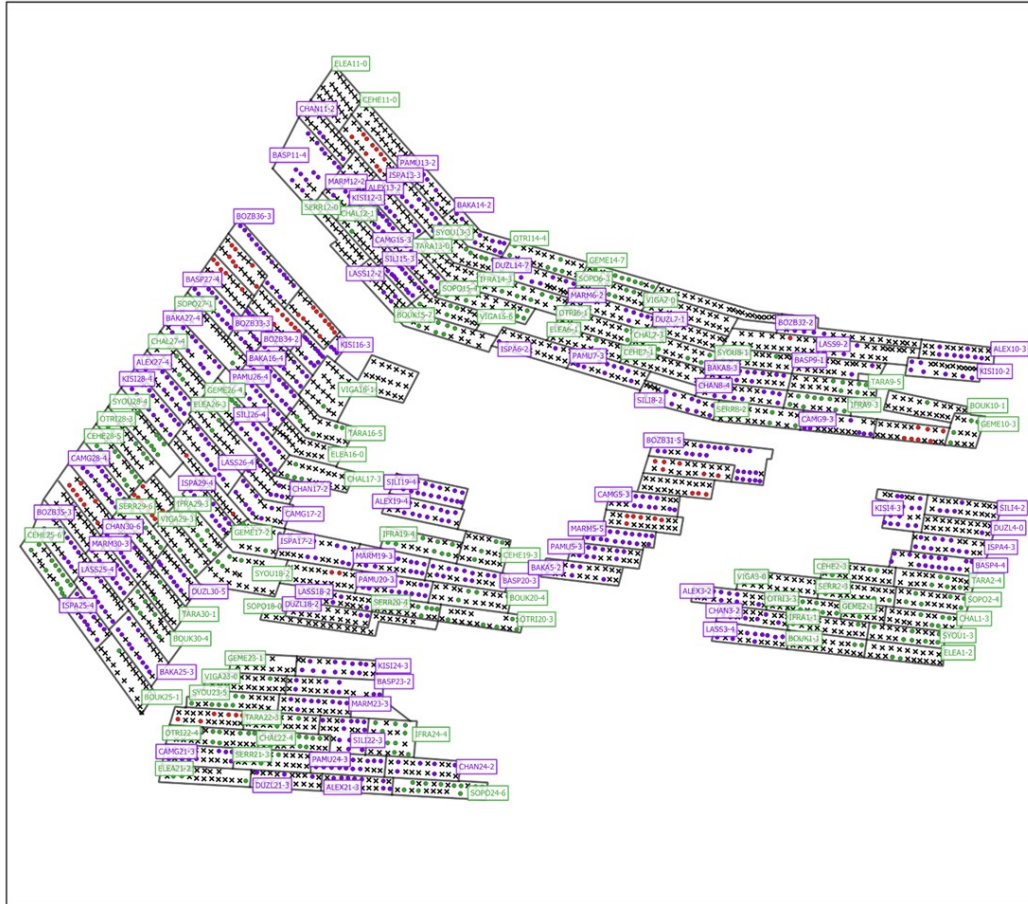
Annexe 2. Minimum, moyenne \pm écart-type et maximum de la variable diamètre des branches pour l'ensemble des provenances.

Provenance	n	Minimum	Moyenne \pm é.-t.	Maximum
ALEX	59	1	1,74 \pm 0,71	4
BAKA	69	1	1,33 \pm 0,53	3
BASP	72	1	1,68 \pm 0,60	3
BOUK	22	1	1,68 \pm 0,57	3
BOZB	71	1	1,51 \pm 0,61	3
CAMG	66	1	1,53 \pm 0,68	3
CEHE	32	1	1,66 \pm 0,54	3
CHAL	29	1	1,96 \pm 0,62	3
CHAN	47	1	1,40 \pm 0,61	3
DUZL	25	1	2,32 \pm 0,94	4
ELEA	9	2	2,33 \pm 0,71	4
GEME	22	1	1,73 \pm 0,83	4
IFRA	47	1	1,74 \pm 0,64	3
ISPA	62	1	1,55 \pm 0,67	4
KISI	78	1	1,73 \pm 0,66	3
LASS	40	1	1,72 \pm 0,64	3
MARM	62	1	1,84 \pm 0,83	4
OTRI	33	1	1,79 \pm 0,65	3
PAMU	73	1	1,51 \pm 0,63	4
SERR	23	1	1,96 \pm 0,47	3
SILI	75	1	1,52 \pm 0,55	3
SOPO	25	1	1,84 \pm 0,85	3
SYOU	36	1	1,67 \pm 0,53	3
TARA	24	1	1,67 \pm 0,64	3
VIGA	10	1	1,70 \pm 0,48	2

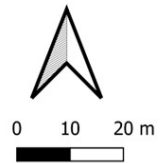
Annexe 3. Minimum, moyenne \pm écart-type et maximum de la variable angle des branches pour l'ensemble des provenances.

Provenance	n	Minimum	Moyenne \pm é.-t.	Maximum
ALEX	59	1,0	1,52 \pm 0,41	2,5
BAKA	69	1,0	1,66 \pm 0,44	2,5
BASP	72	1,0	1,58 \pm 0,40	2,5
BOUK	22	1,5	2,0 \pm 0,49	2,5
BOZB	71	1,0	1,46 \pm 0,35	2,5
CAMG	66	1,0	1,65 \pm 0,45	2,5
CEHE	32	1,5	2,17 \pm 0,53	3,0
CHAL	29	1,5	2,05 \pm 0,52	3,0
CHAN	47	1,0	1,66 \pm 0,42	2,5
DUZL	25	1,0	1,92 \pm 0,51	2,5
ELEA	9	1,5	2,44 \pm 0,39	3,0
GEME	22	1,0	2,0 \pm 0,51	3,0
IFRA	47	1,5	2,18 \pm 0,45	3,0
ISPA	62	1,0	1,56 \pm 0,29	2,5
KISI	78	1,0	1,51 \pm 0,39	2,5
LASS	40	1,0	1,51 \pm 0,43	2,5
MARM	62	1,0	1,71 \pm 0,53	3,0
OTRI	33	1,0	2,15 \pm 0,51	3,0
PAMU	73	1,0	1,58 \pm 0,52	3,0
SERR	23	1,0	1,76 \pm 0,50	2,5
SILI	74	1,0	1,75 \pm 0,49	2,5
SOPO	25	1,5	2,10 \pm 0,56	3,0
SYOU	36	1,5	1,99 \pm 0,53	3,0
TARA	24	1,5	2,14 \pm 0,54	3,0
VIGA	10	1,5	2,45 \pm 0,37	3,0

Annexe 4. Répartition des blocs dans la plantation expérimentale de Ceyreste.



DUZL30-5 Brutia
Alep
provenance- bloc- nb de carottes à prélever



8. BIBLIOGRAPHIE

1. Scarascia-Mugnozza, G., Oswald, H., Piussi, P. & Radoglou, K. Forests of the Mediterranean region: gaps in knowledge and research needs. *For. Ecol. Manage.* **132**, 97–109 (2000).
2. Molina-Venegas, R., Aparicio, A., Lavergne, S. & Arroyo, J. Climatic and topographical correlates of plant palaeo- and neoendemism in a Mediterranean biodiversity hotspot. *Ann. Bot.* **119**, 229–238 (2017).
3. Sardans, J. & Peñuelas, J. Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: impacts of climatic change. *Plant Soil* **365**, 1–33 (2013).
4. Moya, D. *et al.* Anatomic basis and insulation of serotinous cones in *Pinus halepensis* Mill. *Trees* **22**, 511–519 (2008).
5. Pausas, J. G., Bradstock, R. A., Keith, D. A. & Keeley, J. E. Plant functional traits in relation to fire in crown-fire ecosystems. *Ecology* **85**, 1085–1100 (2004).
6. Prévosto, B. *Le pin d'Alep en France: 17 fiches pour connaître et gérer.* (Editions Quae, 2013).
7. Barbéro, M., Loisel, R., Quézel, P., Richardson, D. M. & Romane, F. Pines of the Mediterranean Basin. in *Ecology and Biogeography of Pinus* 153–170 (Cambridge University Press, 2000).
8. Nahal, I. Le Pin brutia (*Pinus brutia* Ten. subsp. *brutia*). 1ère partie. *Forêt Méditerranéenne* **5**, 165–172 (1983).
9. Chambel, M. R., Climent, J., Pichot, C. & Ducci, F. Mediterranean Pines (*Pinus halepensis* Mill. and *brutia* Ten.). in *Forest Tree Breeding in Europe* vol. 25 (Springer, 2013).
10. Lamont, B. B., Le Maitre, D. C., Cowling, R. M. & Enright, N. J. Canopy seed storage in woody plants. *Bot. Rev.* **57**, 277–317 (1991).
11. Tapias, R., Gil, L., Fuentes-Utrilla, P. & Pardos, J. A. Canopy Seed Banks in Mediterranean Pines of South-Eastern Spain: A Comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Ait., *P. nigra* Arn. and *P. pinea* L. *J. Ecol.* **89**, 629–638 (2001).
12. Quézel, P. & Barbero, M. Le pin d'Alep et les espèces voisines : répartition et caractères écologiques généraux, sa dynamique en France méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne* **13**, 158–170 (1992).

13. Inventaire forestier national. *La forêt française - Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2009 à 2013 (région Provence-Alpes-Côte d'Azur)*. 110 (2014).
14. Inventaire forestier national. *La forêt française - Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2005 à 2009 (région Provence-Alpes-Côte d'Azur)*. 24 (2010).
15. Vennetier, M., Ripert, C. & Rathgeber, C. Autecology and growth of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.): A comprehensive study in France. *For. Ecol. Manage.* **413**, 32–47 (2018).
16. Gondard, H., Romane, F., Aronson, J. & Shater, Z. Impact of soil surface disturbances on functional group diversity after clear-cutting in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) forests in southern France. *For. Ecol. Manage.* **180**, 165–174 (2003).
17. Langbour, P., Gérard, J., Guibal, D. & Mahlani, K. Caractérisation technologique et valorisation en bois d'œuvre du pin d'Alep de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *Forêt Méditerranéenne* **32**, 263–270 (2011).
18. Daoui, A., Douzet, J., Marchal, R. & Zerizer, A. Valorisation du bois de pin d'Alep par déroulage : optimisation de son étuvage. *Bois et Forêts des Trop.* **4**, 51–64 (2007).
19. Thibaut, B., Chanson, B., Dilem, A. & Loup, C. La valorisation du pin d'Alep en zone méditerranéenne française. *Forêt Méditerranéenne* **3**, 226–233 (1992).
20. AFNOR. Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : bois massif. *NF B52-001-1* (2018).
21. Cramer, W. *et al.* Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Clim. Change* **8**, 972–980 (2018).
22. Giorgi, F. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.* **33**, (2006).
23. Peña-Angulo, D. *et al.* Long-term precipitation in Southwestern Europe reveals no clear trend attributable to anthropogenic forcing. *Environ. Res. Lett.* **15**, 094070 (2020).
24. Rita, A. *et al.* The impact of drought spells on forests depends on site conditions: The case of 2017 summer heat wave in southern Europe. *Glob. Change Biol.* **26**, 851–863 (2019).
25. Barbeta, A. *et al.* The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest. *Glob. Change Biol.* **21**, 1213–1225 (2014).
26. Allen, C. D. *et al.* A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* **259**, 660–684 (2010).

27. Guada, G., Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R. & Cerrillo, R. M. N. Limited Growth Recovery after Drought-Induced Forest Dieback in Very Defoliated Trees of Two Pine Species. *Front. Plant Sci.* **7**, (2016).
28. Camarero, J. J., Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Oliva, J. & M. Vicente-Serrano, S. To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *J. Ecol.* **103**, 44–57 (2015).
29. Sangüesa-Barreda, G., Linares, J. C. & Camarero, J. J. Reduced growth sensitivity to climate in bark-beetle infested Aleppo pines: Connecting climatic and biotic drivers of forest dieback. *For. Ecol. Manage.* **357**, 126–137 (2015).
30. Rolland, C. & Lempérière, G. Effects of climate on radial growth of Norway spruce and interactions with attacks by the bark beetle *Dendroctonus micans* (Kug., Coleoptera: Scolytidae): a dendroecological study in the French Massif Central. *For. Ecol. Manage.* **201**, 89–104 (2004).
31. Robbins, Z. J. *et al.* Warming increased bark beetle-induced tree mortality by 30% during an extreme drought in California. *Glob. Change Biol.* **28**, 509–523 (2022).
32. Cornelissen, J. H. C. *et al.* A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. J. Bot.* **51**, 335 (2003).
33. McGill, B., Enquist, B., Weiher, E. & Westoby, M. Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends Ecol. Evol.* **21**, 178–185 (2006).
34. Nicotra, A. B. *et al.* Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends Plant Sci.* **15**, 684–692 (2010).
35. Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V. & Brüggemann, W. Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environ. Exp. Bot.* **111**, 91–113 (2015).
36. Savolainen, O., Pyhäjärvi, T. & Knürr, T. Gene Flow et Local Adaptation in Trees. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **38**, 595–619 (2007).
37. Boshier, D. *et al.* Is local best? Examining the evidence for local adaptation in trees and its scale. *Environ. Evid.* **4**, 20 (2015).
38. Lascoux, M., Glémin, S. & Savolainen, O. Local Adaptation in Plants. in *Encyclopedia of Life Sciences* (ed. John Wiley & Sons, Ltd) 1–7 (John Wiley & sons, 2016). doi:10.1002/9780470015902.a0025270.

39. Lindner, M. *et al.* Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* **259**, 698–709 (2010).
40. Brewer, S., Cheddadi, R., de Beaulieu, J. L. & Reille, M. The spread of deciduous *Quercus* throughout Europe since the last glacial period. *For. Ecol. Manage.* **156**, 27–48 (2002).
41. Pearson, R. Climate change and the migration capacity of species. *Trends Ecol. Evol.* **21**, 111–113 (2006).
42. Malcolm, J. R., Markham, A., Neilson, R. P. & Garaci, M. Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *J Biogeography* **29**, 835–849 (2002).
43. Zhu, K., Woodall, C. W. & Clark, J. S. Failure to migrate: lack of tree range expansion in response to climate change. *Glob. Change Biol.* **18**, 1042–1052 (2012).
44. Kremer, A. *et al.* Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecol. Lett.* **15**, 378–392 (2012).
45. Mclachlan, J. S., Clark, J. S. & Manos, P. S. Molecular indicators of tree migration capacity under rapid climate change. *Ecology* **8**, 2088–2098 (2005).
46. Petit, S. *et al.* Fichier écologique des essences. *Forêt.Nature, UCLouvain-ELIe, ULiège-GxABT, SPWARNE-DNF* (2017).
47. Seidl, R., Spies, T. A., Peterson, D. L., Stephens, S. L. & Hicke, J. A. Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services. *J. Appl. Ecol.* **53**, (2016).
48. Vilà-Cabrera, A., Coll, L., Martínez-Vilalta, J. & Retana, J. Forest management for adaptation to climate change in the Mediterranean basin: A synthesis of evidence. *For. Ecol. Manage.* **407**, 16–22 (2018).
49. Vitt, P., Havens, K., Kramer, A. T., Sollenberger, D. & Yates, E. Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biol. Conserv.* **143**, 18–27 (2010).
50. Williams, M. I. & Dumroese, R. K. Preparing for Climate Change: Forestry and Assisted Migration. *J. For.* **111**, 287–297 (2013).
51. Hof, R. A., Dymond, C. C. & Mladenoff, J. D. Climate change mitigation through adaptation: the effectiveness of forest diversification by novel tree planting regimes. *Ecosphere* **8**, (2017).
52. Aitken, S., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T. & Curtis-McLane, S. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evol. Appl.* **1**, 95–111 (2008).

53. Hewitt, N. *et al.* Taking stock of the assisted migration debate. *Biol. Conserv.* **144**, 2560–2572 (2011).
54. Benito-Garzón, M., Ha-Duong, M., Frascaria-Lacoste, N. & Fernández-Manjarrés, J. Habitat restoration and climate change: Dealing with climate variability, incomplete data, and management decisions with tree translocations. *Restor. Ecol.* **21**, 530–536 (2013).
55. Langlet, O. Two hundred years genecology. *Taxon* **20**, 653–721 (1971).
56. Risk, C., McKenney, D. W., Pedlar, J. & Lu, P. A compilation of North American tree provenance trials and relevant historical climate data for seven species. *Sci. Data* **8**, 29 (2021).
57. Kapeller, S. *et al.* Provenance Trials in Alpine Range – Review and Perspectives for Applications in Climate Change. in *Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks* vol. 14 (2013).
58. Eccher, A., Fusaro, E. & Pelleri, F. Résultats de l’expérimentation italienne sur les principales provenances de pins de la section halepensis dix ans après la plantation. *Forêt Méditerranéenne* **9**, 5–14 (1987).
59. Bariteau, M. & Pommery, J. Variabilité géographique et adaptation aux contraintes du milieu méditerranéen des pins de la section halepensis: résultats (provisoires) d’un essai en plantations comparatives en France. *Ann. For. Sci.* **49**, 261–276 (1992).
60. Pichot, C., Pichot, C. & Vauthier, D. FAO-Silva Mediterranea and IUFRO WG 20213 Expert Joint Meeting ; Promotion and use of results from the international trials of Mediterranean Conifers, Rome, Italie. (2007).
61. Prevosto, B. Les indices de compétition en foresterie: exemples d’utilisation, intérêts et limites. *Rev. For. Fr.* **57**, 413–430 (2005).
62. Connell, J. H. Apparent versus ‘real’ competition in plants. in *Perspectives on Plant Competition* 9–26 (Academic Press, Inc., 1990).
63. Zhang, Z. *et al.* The effect of tree size, neighborhood competition and environment on tree growth in an old-growth temperate forest. *J. Plant Ecol.* **10**, 970–980 (2017).
64. Linares, J. C., Camarero, J. J. & Carreira, J. A. Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *J. Ecol.* **98**, 592–603 (2010).

65. Schwinning, S. & Weiner, J. Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants. *Oecologia* **113**, 447–455 (1998).
66. Pretzsch, H. & Biber, P. Size-symmetric versus size-asymmetric competition and growth partitioning among trees in forest stands along an ecological gradient in central Europe. *Can. J. For. Res.* **40**, (2010).
67. Castagneri, D. *et al.* Meta-analysis Reveals Different Competition Effects on Tree Growth Resistance and Resilience to Drought. *Ecosystems* **25**, 30–43 (2022).
68. Gómez-Aparicio, L., García-Valdés, R., Ruíz-benito, P. & A.Zavala, M. Disentangling the relative importance of climate, size and competition on tree growth in Iberian forests: implications for forest management under global change. *Glob. Change Biol.* **17**, 2400–2414 (2011).
69. Tomé, M. & Burkhart, H. E. Distance-Dependent Competition Measures for Predicting Growth of Individual Trees. *For. Sci.* **35**, 816–831 (1989).
70. De Luis, M., Raventos, J., Cortina, J., Moro, M. J. & Bellot, J. Assessing components of a competition index to predict growth in an even-aged *Pinus nigra* stand. *New For.* **15**, 223–242 (1998).
71. Radtke, P. J., Westfall, J. A. & Burkhart, H. E. Conditioning a distance-dependent competition index to indicate the onset of inter-tree competition. *For. Ecol. Manage.* **175**, 17–30 (2003).
72. Munro, D. Forest growth models-a prognosis. in *Growth Models for Tree and Stand Simulation* 7–21 (Fries J. Royal College of Forestry, 1974).
73. Biging, G. S. & Dobbertin, M. Evaluation of Competition Indices in Individual Tree Growth Models. *For. Sci.* **41**, 360–377 (1995).
74. Torresan, C. *et al.* Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *Int. J. Remote Sens.* **38**, 2427–2447 (2017).
75. Mohan, M. *et al.* Individual Tree Detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Canopy Height Model in an Open Canopy Mixed Conifer Forest. *Forests* **8**, 340 (2017).
76. Thiel, C. & Schullius, C. Comparison of UAV photograph-based and airborne lidar-based point clouds over forest from a forestry application perspective. *Int. J. Remote Sens.* **38**, 2411–2426 (2017).

77. Sandino, J., Pegg, G., Gonzalez, F. & Smith, G. Aerial Mapping of Forests Affected by Pathogens Using UAVs, Hyperspectral Sensors, and Artificial Intelligence. *Sensors* **18**, (2018).
78. Larrinaga, A. R. & Brotons, L. Greenness Indices from a Low-Cost UAV Imagery as Tools for Monitoring Post-Fire Forest Recovery. *Drones* **3**, (2019).
79. Vanderwel, M. C., Lopez, E. L., Sprott, A. H., Khayyatkhooshnevis, P. & Shovon, T. A. Using aerial canopy data from UAVs to measure the effects of neighbourhood competition on individual tree growth. *For. Ecol. Manage.* **461**, 117949 (2020).
80. Shovon, T. A., Sprott, A., Gagnon, D. & Vanderwel, M. C. Using imagery from unmanned aerial vehicles to investigate variation in snag frequency among forest stands. *For. Ecol. Manage.* **511**, 120138 (2022).
81. Hegyi, F. A simulation model for managing jack pine stands. in *Growth models for Tree and Stand Simulations* 74–90 (Fries J., 1974).
82. Pukkala, T. & Kolström, T. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fenn.* **21**, 55–67 (1987).
83. Wykoff, W. R., Crookston, N. L. & Stage, A. R. *User's Guide to the Stand Prognosis Model General Technical Report INT-122*. 119 (1982).
84. Hijmans, R. J. *et al.* raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.5-21. (2022).
85. Bivand, R. *et al.* spdep: Spatial Dependence: Weighting Schemes, Statistics. R package version 1.2-5. (2022).
86. Lenth, R. V. *et al.* emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package 1.8.0. (2022).
87. Pinheiro, J. *et al.* nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-159. (2022).
88. Bates, D. *et al.* lme4: Linear Mixed-Effects Models using 'Eigen' and S4. R package version 1.1-30. (2022).
89. Barton, K. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.46.0. (2022).
90. Robin, X. *et al.* pROC: Display and Analyze ROC Curves. R package version 1.18.0. (2021).
91. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. (2021).

92. Kuehne, C., Weiskittel, A. R. & Waskiewicz, J. Comparing performance of contrasting distance-independent and distance-dependent competition metrics in predicting individual tree diameter increment and survival within structurally-heterogeneous, mixed-species forests of Northeastern United States. *For. Ecol. Manage.* **433**, 205–216 (2019).
93. Helluy, M., Prévosto, B., Cailleret, M., Fernandez, C. & Balandier, P. Competition and water stress indices as predictors of *Pinus halepensis* Mill. radial growth under drought. *For. Ecol. Manage.* **460**, 117877 (2020).
94. Ganz, S., Käber, Y. & Adler, P. Measuring Tree Height with Remote Sensing—A Comparison of Photogrammetric and LiDAR Data with Different Field Measurements. *Forests* **10**, (2019).
95. de Luis, M. *et al.* Plasticity in Dendroclimatic Response across the Distribution Range of Aleppo Pine (*Pinus halepensis*). *PLoS ONE* **8**, e83550 (2013).
96. Voltas, J., Chambel, M. R., Prada, M. A. & Ferrio, J. P. Climate-related variability in carbon and oxygen stable isotopes among populations of Aleppo pine grown in common-garden tests. *Trees* **22**, 759–769 (2008).
97. Martín-Sanz, R. C. *et al.* Disentangling plasticity of serotiny, a key adaptive trait in a Mediterranean conifer. *Am. J. Bot.* **103**, 1582–1591 (2016).
98. Semerci, A., İmal, B. & Gonzalez-Benecke, C. A. Intraspecific variability in cold tolerance in *Pinus brutia* sampled from two contrasting provenance trials. *New For.* **52**, 621–637 (2021).
99. Panetsos, K., Scaltsoyiannes, A., Aravanopoulos, F. A., Dounavi, K. & Demetrakopoulos, A. Identification of *Pinus brutia* TEN., *P. halepensis* MILL. and Their Putative Hybrids. *Silvae Genet.* **46**, 253–257 (1997).
100. Hosmer, D. W. & Lemeshow, S. *Applied Logistic Regression*. (John Wiley & Sons, Inc., 2000). doi:10.1002/0471722146.
101. Erasmus, J., Kunneke, A., Drew, D. M. & Wessels, C. B. The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density. *Forestry* **91**, 247–258 (2018).
102. Jensen, A. M. & Löf, M. Effects of interspecific competition from surrounding vegetation on mortality, growth and stem development in young oaks (*Quercus robur*). *For. Ecol. Manage.* **392**, 176–183 (2017).
103. Birk M., E. Stem and branch form of 20-year-old radiata pine in relation to previous land use. *Aust. For.* **54**, 30–39 (1991).

104. Kahriman, A., Şahin, A., Sönmez, T. & Yavuz, M. A novel approach to selecting a competition index: the effect of competition on individual-tree diameter growth of Calabrian pine. *Can. J. For. Res.* **48**, 1217–1226 (2018).
105. Vennetier, M. *et al.* Évaluation de la croissance du pin d'Alep en région méditerranéenne française. *Rev. For. Fr.* **5**, (2010).
106. Landmann, G. Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. *Rev. For. Fr.* **46**, 405–415 (1994).
107. MedECC. *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report.* 632 (2020).
108. Manion, P. D. *Tree disease concepts.* (Prentice-Hall, 1981).