

Le pin d'Alep : évolution, acclimatation et adaptation au changement climatique

par Bruno FADY, Bernard BOUTTE, Hendrik DAVI,
Nicolas MARTIN-St PAUL, Myriam MORENO, Bernard PREVOSTO,
Eric RIGOLOT et Guillaume SIMIONI

**Le pin d'Alep sera-t-il
un des gagnants
du changement climatique ?
Les forestiers et gestionnaires
d'espaces naturels pourront-ils
compter sur cette ressource
au XXI^e siècle ?
C'est à ces questions
que répondent les auteurs
de cet article en s'appuyant
sur différentes approches :
évolutive, sanitaire, écologique,
physiologique et sylvicole.**

Introduction

Il existe quelque 110 espèces de pins dans le monde dont l'histoire évolutive est assez bien décrite grâce aux outils de la taxonomie et de la phylogénétique (GERNANDT *et al.* 2005). L'Europe et la Méditerranée n'abritent qu'une dizaine de ces espèces que l'on peut répartir en deux clades phylogénétiquement bien distincts depuis une centaine de millions d'années. Le premier clade contient les pins de montagne : *Pinus mugo* Turra, *P. nigra* J.F.Arnold, *P. sylvestris* L. et *P. uncinata* Ramond ex DC. ; et le second clade les pins méditerranéens au sens large : *Pinus brutia* Ten., *P. canariensis* C.Sm., *P. halepensis* Mill., *P. heldreichii* Christ, *P. pinaster* Aiton et *P. pinea* L. (MÉDAIL *et al.* 2019). Dans cet ensemble, le groupe *Pinus halepensis* / *brutia* forme un complexe d'espèces partiellement inter-fertiles, individualisé depuis un peu moins de 80 millions d'années à la fin de l'ère secondaire (ECKERT & HALL, 2006).

La place du pin d'Alep dans la phylogénie des pins euro-méditerranéens est donc une histoire ancienne, bien antérieure à l'installation du climat méditerranéen dans le monde à la fin de l'ère tertiaire. Ses caractéristiques biologiques et écologiques lui ont cependant permis de parfaitement s'insérer dans ce nouveau contexte climatique et de s'y étendre à la faveur des épisodes interglaciaires de l'ère quaternaire, alors que les épisodes glaciaires ont contribué à fortement réduire son expansion géographique (FADY 2012). La question qui intéresse maintenant les propriétaires, gestionnaires et décideurs politiques forestiers est de savoir quelle sera la place du pin d'Alep au XXI^e siècle dans les peuplements forestiers méditerranéens soumis au changement climatique lié aux activités humaines. Le pin d'Alep est-il une ressource sur

laquelle les forestiers et gestionnaires d'espaces naturels peuvent compter au XXI^e siècle ? C'est ce que nous allons évoquer ici sous différents angles : évolutif, sanitaire, écologique, physiologique et sylvicole.

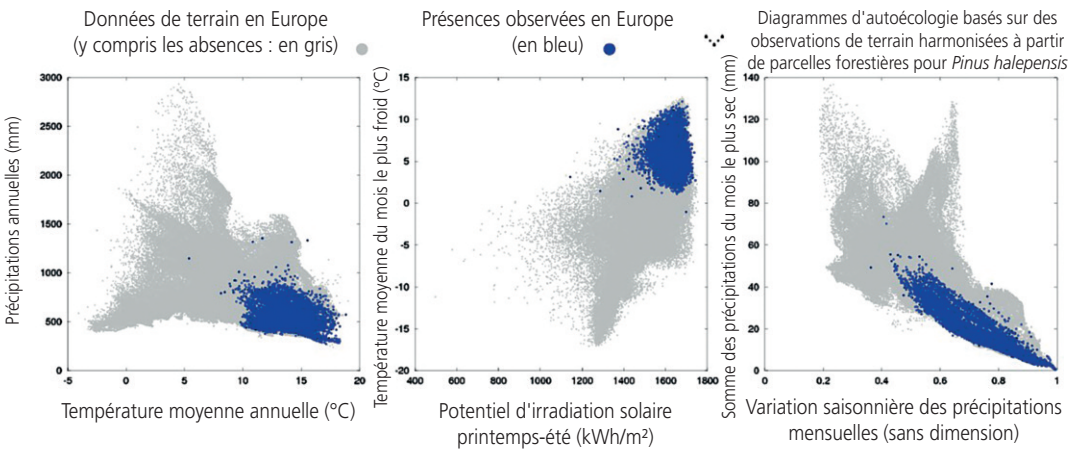
La répartition du pin d'Alep en France et sa niche écologique

Pinus halepensis occupe environ 3,5 millions d'hectares en Méditerranée, en Afrique du Nord et de l'Espagne à la Grèce en Europe du sud (Cf. Fig. 1). On le rencontre entre le niveau de la mer et 600 m d'altitude en Europe et parfois jusqu'à 2000 m altitude au Maghreb. Indifférent au substrat, on le trouve habituellement dans des conditions de précipitations annuelles variant entre 350 et 700 mm et des températures moyennes annuelles variant de -2°C à +10°C, voire au-delà au Maghreb et en Israël (FADY *et al.* 2003).



Fig. 1 (ci-dessus) : Aire de répartition géographique naturelle du pin d'Alep. EUFORGEN.

Fig. 2 (ci-contre) : Situation de la niche climatique du pin d'Alep en Europe (points bleus) en comparaison de celle des espèces d'arbres forestiers méditerranéens (points gris). D'après Mauri *et al.* (2016).



L'amplitude considérable des conditions environnementales favorables au pin d'Alep et le fait qu'il occupe les habitats les plus extrêmes en Europe sont le reflet de sa très large niche écologique : parmi toutes les espèces forestières européennes, il est l'une de celles qui tolère le mieux la chaleur, le manque d'eau et la sécheresse estivale, le rayonnement solaire estival, mais tolère le moins bien les froids hivernaux (Cf. Fig. 2, MAURI *et al.* 2016).

En France, le pin d'Alep occupe l'ensemble de la grande région écologique (GRECO) Méditerranée, à l'exception de la Corse (Cf. Fig. 3). Sa surface a été multipliée par plus de quatre entre la deuxième moitié du XIX^e siècle et le début du XXI^e siècle, pour atteindre un peu plus de 230 000 ha et un volume sur pied de 17 millions de m³ en 2010, pour 3/5 sous forme de peuplements monospécifiques (données 2013-2017 de l'Inventaire forestier national, IGN 2018). Au même titre que le chêne pubescent (367 000 ha) et le chêne vert (441 000 ha), le pin d'Alep constitue une ressource forestière considérable en France.

La place du pin d'Alep et ses potentialités dans un contexte de changement climatique : les atouts

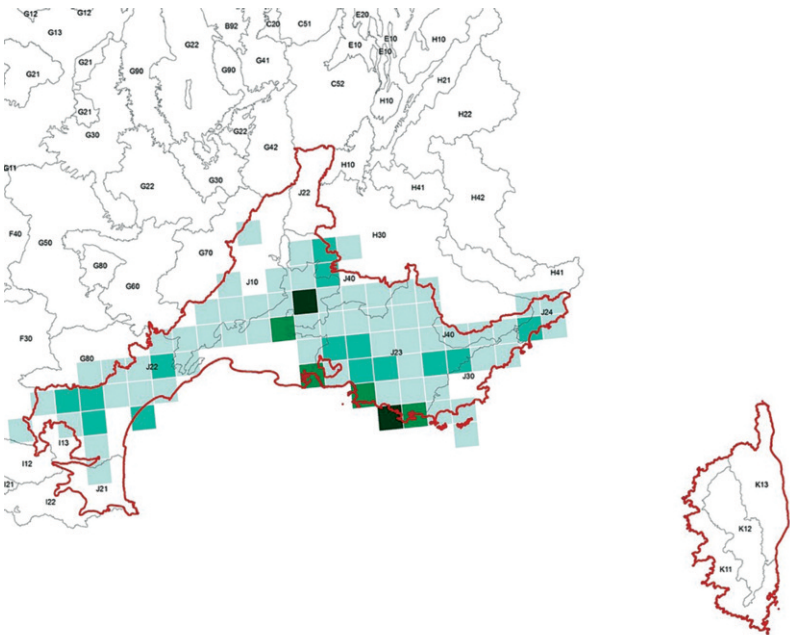
La tolérance à la sécheresse

Le changement climatique est responsable d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans la zone euro-méditerranéenne. De par ses caractéris-

tiques physiologiques, le pin d'Alep dispose d'atouts primordiaux pour tolérer les sécheresses extrêmes. Cette tolérance est bien reflétée par son aire de répartition très méridionale. Du fait de l'extension probable du climat méditerranéen vers le nord de l'Europe au cours du XXI^e siècle, BURAS & MENZEL (2019) suggèrent une extension de l'aire de répartition du pin d'Alep vers le nord sous changement climatique sévère, ainsi qu'une rétraction dans des zones devenant trop arides comme en Afrique du Nord et en Espagne du sud et du centre (Cf. Fig. 4).

Les connaissances écophysiologiques liées au transport de l'eau permettent de comprendre sa grande tolérance à la sécheresse. Un rappel des mécanismes est utile pour appréhender les caractéristiques permettant au pin d'Alep de tolérer la sécheresse.

Les plantes transpirent de grandes quantités d'eau qui s'évaporent à la surface des feuilles, au niveau d'orifices appelés stomates. L'eau transpirée transite par un système vasculaire (les vaisseaux du xylème) sous forme de colonnes liquides, cohésives des racines aux feuilles, grâce à la tension (le potentiel hydrique, une pression négative, s'exprimant en MPa) générée par la demande évaporative de l'atmosphère. Lors d'une sécheresse, la transpiration n'est plus compensée par l'absorption racinaire. Cela entraîne une tension considérable sur la colonne d'eau (c'est-à-dire des pressions négatives de plusieurs MPa, à comparer à la pression atmosphérique qui est d'environ 0,1 Mpa), qui peut conduire à un changement de phase de l'eau liquide vers un état gazeux plus stable. Ce phénomène physique



est appelé cavitation. Une fois la cavitation survenue, les vaisseaux remplis d'air ne peuvent plus conduire l'eau vers les tissus vivants. Il a été montré expérimentalement que le niveau de cavitation suite à une sécheresse était bien corrélé avec le niveau de mortalité (MARTIN-STPAUL *et al.* 2017 ; ADAMS *et al.* 2018).

Une plante dispose de deux moyens primordiaux pour limiter le dessèchement causé par la cavitation et donc tolérer la sécheresse. Le premier est de posséder un système vasculaire résistant à la cavitation. Cette caractéristique est mesurable en laboratoire. Elle est souvent résumée par un paramètre appelé P50, qui correspond au niveau de potentiel hydrique induisant 50 % de cavitation (ou 50 % de perte de conduc-

Fig. 3 :
Variation du volume sur pied du pin d'Alep en région méditerranéenne française (données 2013-2017 de l'Inventaire forestier national, IGN 2018). Plus la couleur est foncée, plus le volume sur pied est élevé.

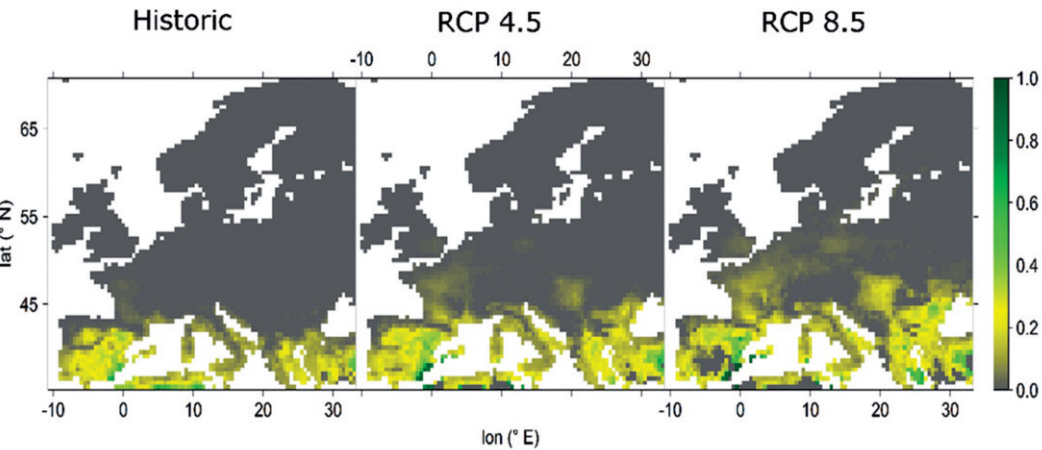
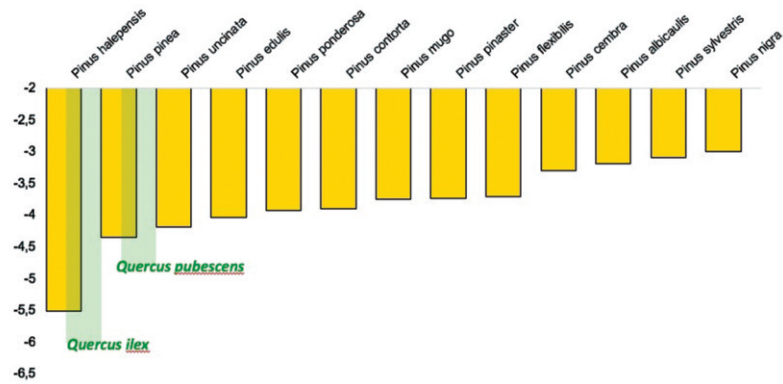


Fig. 4 (ci-contre) :
Probabilité d'abondance relative de *Pinus halepensis* sous trois scénarios climatiques futurs à l'horizon 2061-2090 : à gauche, climat actuel sans changement (« historic »), au centre le RCP 4.5 (un scénario d'émission de gaz à effet de serre moyennement vertueux) et à droite le RCP 8.5 (un scénario peu vertueux, souvent qualifié de « business as usual »). La probabilité d'abondance relative augmente du gris vers le jaune puis le vert. D'après Buras & Menzel (2019).

Fig. 5 :
Valeur moyenne de
résistance à la cavitation
(P50, en MPa)
de quelques pins.
Les valeurs de P50
du chêne vert
et du chêne pubescent
sont également indiquées
à titre de comparaison.



tance hydraulique). L'autre est de limiter la consommation d'eau (la transpiration) en condition de sécheresse pour éviter les potentiels hydriques extrêmes. Ce dernier mécanisme repose sur la capacité des stomates à se fermer rapidement en condition de sécheresse et à maintenir une transpiration minimale (ou cuticulaire) très faible une fois les stomates fermés.

Le pin d'Alep est efficace sur les deux tableaux. D'une part, c'est l'espèce de pin

dotée de la plus forte résistance à la cavitation (P50 de l'ordre de -5,5 MPa, Cf. Fig. 5). De plus, il a une fermeture stomatique très efficace et une transpiration minimale très faible, de l'ordre de trois fois inférieure à celle du chêne vert.

Ces caractéristiques lui confèrent une plus grande sécurité hydraulique que le chêne vert qui a une régulation stomatique moins efficace. La figure 6 montre les valeurs minimales annuelles de potentiel hydrique pour le chêne vert et le pin d'Alep sur le site expérimental de Font-Blanche (Bouches-du-Rhône) depuis 10 ans. Les valeurs seuils de potentiel hydrique conduisant à la fermeture des stomates et à la cavitation sont indiquées. Il apparaît que le pin d'Alep ne dépasse jamais les seuils conduisant à la cavitation, comparativement au chêne vert qui les dépasse lors de sécheresses extrêmes, comme celles qui ont eu lieu dans la région entre 2015 et 2019. Notons toutefois que la succession de sécheresses récentes a conduit à de la mortalité chez certains individus de pin et de chêne sur le site de Font-Blanche, sans que l'on soit pour l'instant en mesure d'en affirmer la cause exacte.

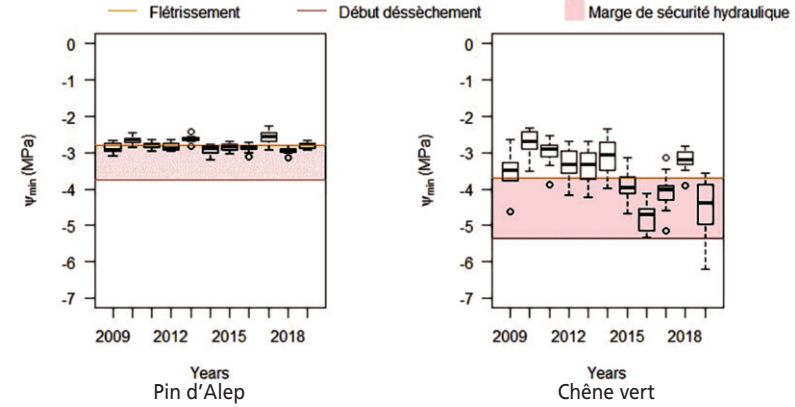


Fig. 6 (ci-dessus) :
Les marges de sécurité
hydraulique du pin d'Alep
(à gauche) et du chêne
vert (à droite) de 2009 à
2019 (en rouge).
Les valeurs de potentiel
hydrique minimales
annuelles (en noir, Ψ_{min})
ont été mesurées
sur le site expérimental
de Font-Blanche.
Alors que les sécheresses
extrêmes ont conduit à
un dépassement du seuil
de cavitation pour le
chêne vert, le pin d'Alep
se maintient au-dessus.

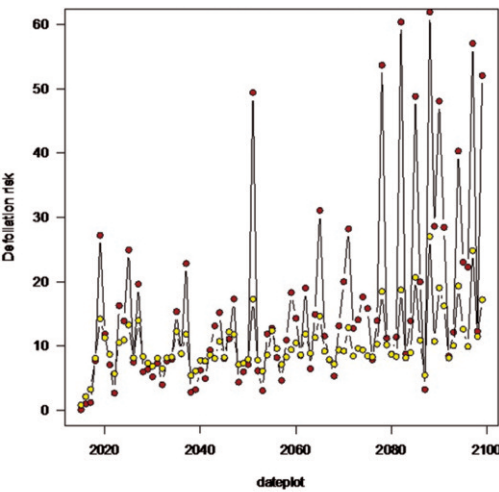


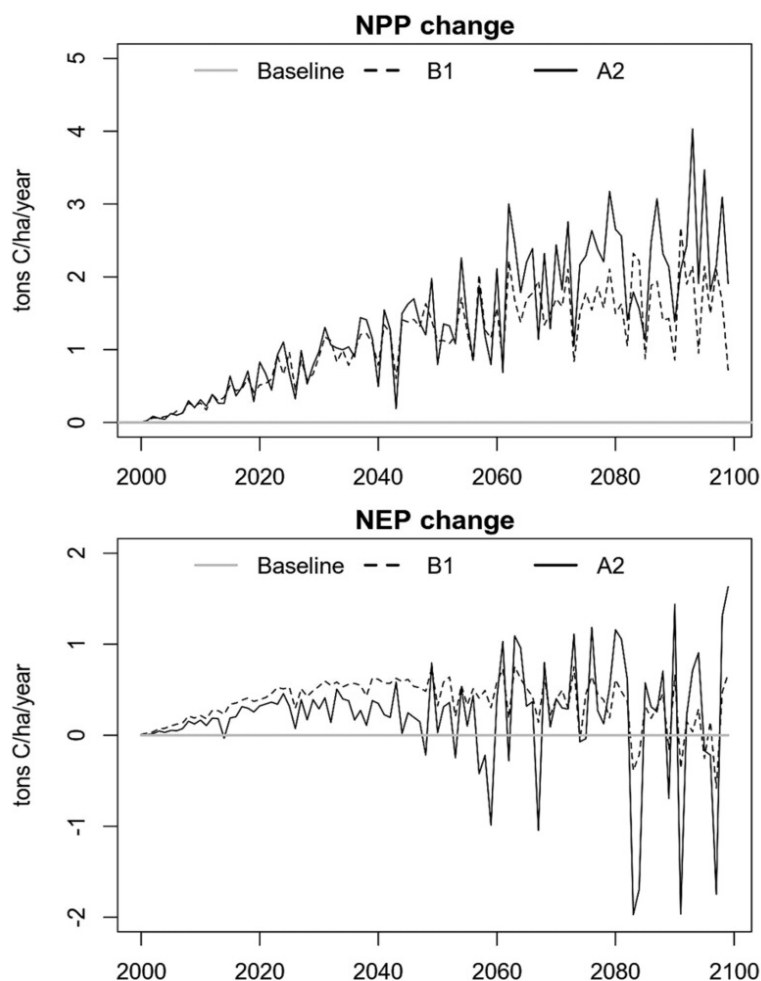
Fig. 7 (ci-contre) :
Risque annuel de cavitation calculé avec le modèle
SurEau de 2015 à 2100 pour le chêne vert (rouge)
et le pin d'Alep (jaune) en utilisant les données
climatiques issues du modèle HadGem
sous un scénario RCP8.5.

Productivité et séquestration de carbone actuels et futurs

Le site de Font-Blanche est un des rares sites forestiers en France sur lequel le bilan de carbone est suivi en temps en continu. Il s'agit du seul site au monde réalisant ces mesures sur une forêt mélangée de pin d'Alep et de chêne vert. La présentation détaillée des résultats ayant trait aux mesures de bilan de carbone est proposée dans un autre numéro de *Forêt Méditerranéenne* (à paraître). Pour rappel, il a été mesuré une séquestration de carbone annuelle de 4,5 tonnes/ha/an en moyenne, dont la variabilité interannuelle est largement déterminée par l'intensité du déficit hydrique estival. Cette valeur est élevée pour une forêt méditerranéenne et nous proposons des explications dans l'article mentionné ci-dessus.

Des travaux de simulations ont également été menés pour évaluer l'impact du changement climatique sur la productivité primaire nette (production de biomasse, NPP dans la figure 8) et la séquestration de carbone *in-situ* (accumulation de carbone dans la biomasse et le sol) à Font-Blanche (SIMIONI *et al.* 2020). Le changement climatique augmente l'intensité et la durée du stress hydrique des arbres, mais aussi la durée de la période favorable à la croissance. A cela s'ajoute un effet fertilisant de l'augmentation du CO₂. La combinaison de ces effets entraîne une augmentation de la productivité sur l'ensemble du siècle (Cf. Fig. 8). La séquestration de carbone (NEP dans la figure 8), en revanche, n'est que temporairement stimulée. Ce type de résultats est tout à fait cohérent avec les sorties des modèles de productivité tenant compte de l'effet fertilisant du CO₂, mais l'ampleur de cet effet fertilisant est débattu dans la communauté, notamment parce que nous constatons de nombreux phénomènes de mortalité massive suite aux sécheresses intenses.

Il convient de noter que ces simulations sont faites avec le modèle NOTG, différent de celui mentionné plus haut pour évaluer le risque hydraulique (SurEau ne permet pas de prédire la croissance, ni la séquestration de carbone). Or NOTG n'intègre pas encore le risque hydraulique. Des travaux sont en cours pour faire converger ces approches et affiner les prédictions.



Diversité génétique

Le corollaire de la diversité écologique du pin d'Alep se retrouve dans sa diversité génétique. Mesurée en jardin commun pour des caractères sylvicoles d'importance comme la survie au jeune âge et la croissance en hauteur, elle se révèle considérable lorsque l'on compare des origines géographiques variées comme celles de Grèce, Italie, Afrique du Nord, Espagne et France (BARITEAU 1992). Les essais de l'INRA dans le sud de la France (Vitrolles et Roquefort-la-Bédoule par exemple), montrent que la diversité génétique qui existe entre les différentes origines géographiques (provenances) de pin d'Alep est plus large que la diversité génétique qui existe entre le pin d'Alep et son congénère le pin brutia (Cf. Fig. 9). Si les origines géographiques de Méditerranée orientale montrent une croissance en hauteur très supérieure à celles des autres provenances, elles demeurent sensibles aux froids hivernaux et gelées tardives auxquels échappent les origines locales provençales et languedociennes.

Fig. 8 :

Effets du changement climatique sur la variation de production primaire nette (« NPP change », panneau du haut) et de séquestration de carbone (« NEP change », panneau du bas) au XXI^e siècle (en tonne de carbone par hectare et par an), simulés avec le modèle NOTG

D'après Simioni *et al.* 2020.

Les résultats avec changement climatique modéré (B1) ou sévère (A2) sont exprimés en variations par rapport au climat actuel (baseline). Les simulations démarrent alors que le peuplement est âgé de 60 ans, comme actuellement.

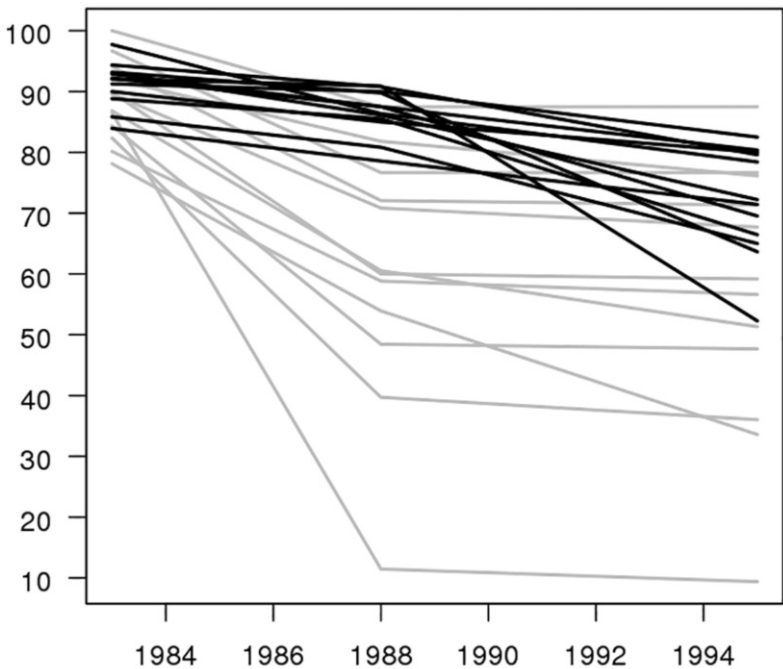


Fig. 9 et photo 1 :
Survie en % (axe des Y)
au cours du temps
(axe des X) dans le jardin
commun de Vitrolles (en
photo) de provenances de
Pinus halepensis (en gris)
et *Pinus brutia* (en noir)
après deux événements
climatiques majeurs
en Provence : le froid
de l'hiver 1984-1985
et la sécheresse
des années 1989-1990.
La provenance qui
présente la meilleure
survie est originaire
de Gémenos dans
les Bouches-du-Rhône.
D'après Pichot,
non publié.



Du fait de cette forte adaptation locale, mais a priori d'une faible différenciation au sein d'une même grande région géographique, la réglementation en vigueur en France en matière de matériel forestier de reproduction (MFR) ne reconnaît qu'une seule région de provenance française et ne recommande et ne subventionne que les MFR issus de peuplements classés français de pin d'Alep lors de travaux de boisement (<https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-dutilisation-des-provenances-et-varietes-forestieres>). Les recommandations actualisées en 2019 du ministère de l'Agriculture indiquent que les MFR de pin d'Alep sont utilisables dans toute la GRECO Méditerranée (sauf en Corse) en dessous de 600 m d'altitude en ubac et de 900 m d'altitude en adret, ce qui correspond bien à une anticipation des effets du changement climatique par rapport aux recommandations des années 1990.

La place du pin d'Alep et ses potentialités dans un contexte de changement climatique : les points plus négatifs

Le pin d'Alep, une espèce qui « favorise » le feu

Au cours des temps évolutifs et sous la pression des perturbations les êtres vivants en région méditerranéenne ont développé des caractères d'adaptation aux régimes historiques de perturbations. Les pins méditerranéens n'y font pas exception, et concernant la perturbation liée au feu, plusieurs stratégies d'adaptation ont été identifiées (KEELEY, 2012). Les deux stratégies d'adaptation les plus marquées opposent les espèces de pin qui tolèrent le feu, du moins jusqu'à un certain point, à celles qui le favorisent, meurent au feu pour mieux renaître de leurs cendres. Le pin pignon fait partie de la première catégorie. Il peut survivre à des feux de faible à moyenne intensité (feu de sous-bois) grâce à quelques caractères morphologiques comme son écorce épaisse, et architecturaux comme son houppier en table, qui préservent relativement les tissus vivants des forts flux thermiques. Le pin d'Alep est le représentant emblématique de la seconde catégorie.

En effet, un faisceau de caractères morphologiques et de régénération post-incendie le classe parmi les facilitateurs du feu. En premier lieu, de par son architecture, le pin d'Alep favorise un peuplement de couvert clair qui permet le développement d'un sous-bois abondant. Le maintien durable des branches mortes sur le tronc favorise une rétention assez longue des aiguilles mortes dans le houppier. Ces deux facteurs contribuent à la continuité verticale du combustible qui facilite les feux de cime dans les pinèdes de pins d'Alep. Ces feux particulièrement puissants sont le plus souvent létaux pour les arbres dont le tronc n'est recouvert que d'une écorce relativement fine et dont les bourgeons sont petits et mal protégés. Sauf circonstances exceptionnelles ou travaux préalables d'élagage et de débroussaillage, aucun individu ne survit à l'incendie des pinèdes de pin d'Alep.

Mais la régénération post-incendie est particulièrement dynamique grâce aux graines libérées par les cônes sérolineux après le passage du feu, une adaptation remarquable

à cette perturbation (Cf. Photo 2). Une partie des cônes constitue une banque de graine aérienne grâce à leurs écailles cachetées par de la résine qui fond au passage du feu. Les graines à l'état de dormance physiologique étaient stockées dans les cônes depuis plusieurs années. Sauf conjoncture trop drastique, la levée de dormance des graines tombées au sol est activée par les conditions physico-chimiques post-incendies favorables. Une fois les graines germées, si les conditions sont réunies pour la survie des semis (prédation limitée, absence de gel...), le caractère pionnier du pin d'Alep s'exprime pleinement par l'abondance des jeunes plantules apparues dans les mois qui suivent la mort par le feu de la génération précédente de pin. Ce phénomène favorise des peuplements denses et équiennes. Cet ensemble de caractères adaptatifs, qui conjugués suivent une stratégie cohérente, constitue un syndrome (KEELEY, 2012).

Finalement, parmi les pins méditerranéens, le pin d'Alep forme les pinèdes parmi les plus vulnérables au feu (Cf. Fig. 10), ce qui est compensé par l'une des meilleures résiliences. Ce constat invite à mettre en œuvre une sylviculture préventive active pour préserver le capital sur pied du risque de destruction par le feu. Les grands principes en sont détaillés dans RIGOLOTT *et al.* (2013), mais ils ne permettent malheureusement pas de protéger toutes les situations de peuplement, ni toutes les classes d'âge.

L'indice Forêt Météo (IFM) est un indice général de danger d'incendie fourni quotidiennement par les services de Météo-France et utilisé par la Sécurité civile pour préparer le dispositif de prévention et de lutte. Fondé essentiellement sur des paramètres météorologiques, il intègre notamment les conséquences des conditions de sécheresse sur la disponibilité au feu de la végétation combustible. FRÉJAVILLE & CURT (2015) ont montré qu'il avait augmenté depuis les débuts de son utilisation en région méditerranéenne française au cours des décennies passées. Des exercices de modélisation utilisant les projections climatiques jusqu'à la fin du siècle prédisent que le danger d'incendie devrait s'accroître encore en France et en Europe dans les prochaines décennies (par exemple BEDIA *et al.* 2014). Les travaux récents de FARGEON *et al.* (2020) ont détaillé l'extension spatiale de la zone à risque liée aux incendies de forêt sur le territoire métropolitain à l'horizon de la fin du siècle en pré-

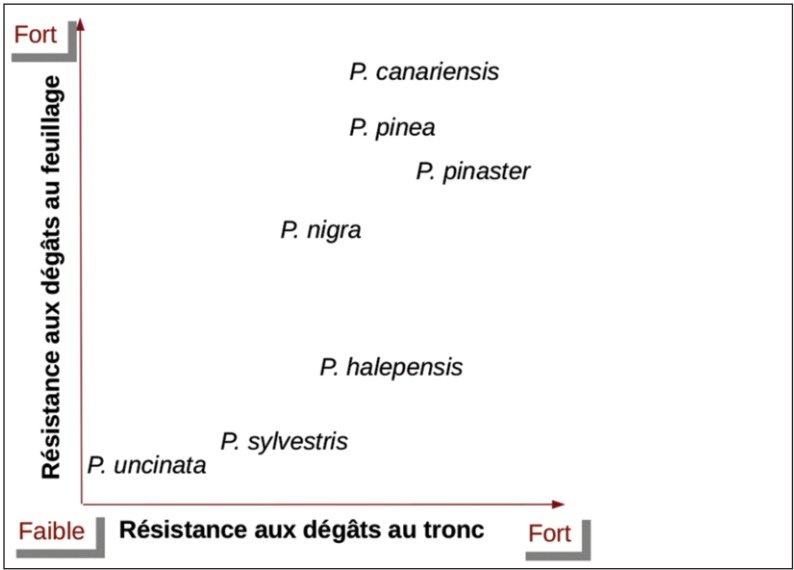


Photo 2 :
Cônes de pin d'Alep sérotineux.
Photo Yvon Duché, ONF.

cisant les incertitudes sur les prévisions régionales. Il en résulte que le renforcement du danger d'incendie dans l'aire actuelle du pin d'Alep est important et empreint de peu d'incertitude.

Dans ce contexte les feux seront plus fréquents, plus violents et la saison à risque de plus longue durée (BEDIA *et al.* 2014). Le pin d'Alep possède des avantages adaptatifs pour se développer et s'étendre sous la pression des feux. Mais ces atouts atteindront leurs limites si le nouveau régime de feux généré par le changement climatique s'éloigne trop de celui qui a permis de sélectionner les caractères d'adaptation qu'on lui connaît aujourd'hui. Ainsi malgré une précocité sexuelle remarquable (NE'EMAN *et al.* 2004), le pin d'Alep régressera inexorablement et parfois brutalement si le retour des incendies passe sous les 20 ans sur un même site, conduisant à une régression progressive de la pinède en garrigue.

Fig. 10 :
Résistance au feu du pin d'Alep, comparativement aux autres pins européens, fondée sur des caractères morphologiques et des expérimentations d'échauffements létaux.
Adapté de Fernandes *et al.* 2008.



1 - Cet avis de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) a été rendu public le 25 juillet 2019, quelques jours après la conférence.

Les problèmes phytosanitaires

Au-delà des dégâts d'origine abiotique (bris de neige, froid hivernal, rares gelées tardives en zone méditerranéenne), les deux principaux problèmes phytosanitaires du pin d'Alep, qui représentent près de 40 % des 900 signalements du Département Santé des forêts (DSF) pour cette espèce sur la période 1989-2017, sont l'hylésine destructeur (*Tomicus destruens*), coléoptère sous-cortical, et la maladie chancreuse des rameaux due à *Crumenulopsis sororia*. Le champignon lignivore, *Phellinus pini*, la ciccadelle des aiguilles des pins, *Haematoloma dorsata* et la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, complètent le panorama des problèmes sanitaires significatifs sur cette essence.

L'hylésine destructeur, coléoptère sous-cortical de 4 à 6 mm de longueur, est un ravageur « de faiblesse », qui peut devenir « épidémique » sur les pins à la suite de chablis ou de périodes de sécheresses successives. Insecte méditerranéen et atlantique de plaine, c'est un des rares scolytes au développement larvaire hivernal (à partir de 6°C). Il entraîne la mortalité des arbres atteints de manière isolée ou sous forme de petits foyers visibles au cours de l'hiver et au printemps ainsi que le rougissement apical des pousses en été (forage des adultes).

La maladie chancreuse des rameaux est à l'origine de nécroses sur les rameaux, qui provoquent le rougissement et la chute des aiguilles par bouquets puis le dessèchement progressif des rameaux. Les arbres atteints présentent un feuillage anormalement rougeâtre, clairsemé et de nombreux rameaux

morts. Son développement est lié à la pluviosité importante en été et en automne qui favorise la phase de contamination du champignon. C'est une des principales causes du déficit foliaire des houppiers de pin d'Alep, notamment dans les situations les plus « humides » de la zone méditerranéenne. Malgré des fortes attaques observées certaines années, des cas de mortalité restent rares et limités à des sujets dominés, à des semis ou à des plants.

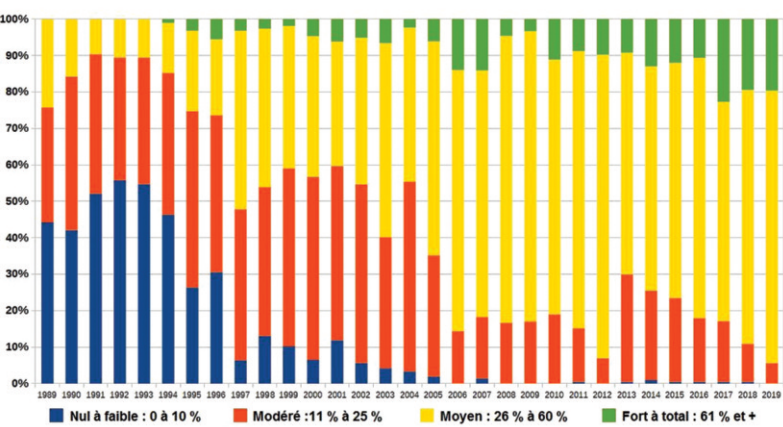
Les suivis de l'état sanitaire des arbres du Réseau systématique de suivi des dommages forestiers du DSF (Cf. Fig. 11) montrent l'évolution moyenne à la hausse sur 30 ans du déficit foliaire des houppiers (par classe de déficit sur 14 placettes permanentes, 210 arbres depuis 1999). Différents paliers apparaissent dans cette dégradation, en fonction des dégâts dus aux agents biotiques : par exemple, la maladie chancreuse en 1995, les sécheresses de 2003 à 2007, le gel de 2012 puis amélioration de l'état sanitaire en 2013 et 2014, ou encore la sécheresse 2017. L'augmentation des périodes de stress hydriques devrait favoriser le développement de l'hylésine sur le pin d'Alep. La prévalence de la maladie chancreuse à *Crumenulopsis* sera variable en fonction de l'évolution de la répartition de la pluviosité annuelle.

Les risques liés aux organismes invasifs

Dans un avis de l'ANSES¹ (gestion des risques des écorces sensibles au nématode du pin), les rédacteurs proposent une classification des espèces résineuses en cinq catégories de sensibilité au nématode du pin (*Bursaphelenchus xylophilus*) (catégories 1 à 3 : non sensibles : espèces non-hôtes du vecteur ou résistance directe au nématode ; catégorie 4 : sensibilité intermédiaire et catégorie 5 : essences très sensibles). Le pin d'Alep est en catégorie 4 : essence-hôte du vecteur et sensibilité intermédiaire au nématode. A titre indicatif, les pins sylvestre, maritime, noir et de Monterey sont en catégorie 5 (déperissements observés au Portugal et Espagne) et le pin pignon en catégorie 3 (pas de reproduction du vecteur).

Pinus halepensis fait partie des espèces de pins présentant aussi une certaine sensibilité à *Gibberella circinata*, agent du chancre suintant des pins, organisme de quarantaine en Europe. Toutefois, le plan de surveillance mis en place depuis 2007 dans le sud de la

Fig. 11 : Suivis de l'état sanitaire des pins d'Alep du Réseau systématique de suivi des dommages forestiers du DSF (période 1989 - 2019) selon quatre classes de déficit foliaire des houppiers.



France par le ministère de l'Agriculture n'a pas permis de le détecter ni dans les peuplements forestiers, ni sur les cônes des pins échantillonnés dans les vergers à graines et les peuplements classés porte-graines.

Sylviculture et problèmes de régénération

Le pin d'Alep est une essence pionnière aussi qualifiée d'expansionniste en raison de son fort pouvoir colonisateur dans les garrigues, et les parcours et cultures abandonnés par l'agriculture. Cette caractéristique a permis une formidable expansion de l'espèce, la surface en pin d'Alep ayant quintuplé en 150 ans ! C'est en effet une espèce du début de la succession végétale qui ne constitue pas de forêts stables pouvant se maintenir sur le très long terme. En effet, en dehors de zones littorales très restreintes, les formations à pin d'Alep évoluent vers des chênaies à chêne vert ou chêne pubescent considérées comme climaciques (QUÉZEL & BARBÉRO, 1992). Cette place particulière dans la dynamique ne lui permet pas de se régénérer facilement sous elle-même en l'absence de perturbation majeure comme le passage du feu.

Les peuplements à pin d'Alep sont donc des formations temporaires et leur maintien sur plusieurs générations, dans un contexte hors incendie, ne s'effectue pas spontanément. Dans le cadre d'une gestion, le renouvellement des peuplements matures nécessite une intervention d'intensité plus ou moins forte. Son objectif est de favoriser à nouveau le caractère pionnier de l'espèce, c'est-à-dire sa capacité à s'installer dans des milieux après une perturbation.

Classiquement cette perturbation est apportée par la coupe de régénération (ou coupe d'ensemencement) qui consiste à sélectionner des semenciers (environ 100-150 par hectare) en éliminant les autres arbres et le sous-étage quand il est présent. Cependant, pour le pin d'Alep, la coupe n'est souvent pas suffisante pour assurer le renouvellement. En effet, dans les milieux méditerranéens, en plus de la litière, la végétation compétitrice au sol ou végétation interférente est souvent très développée : arbustes et/ou graminées. Cette végétation représente une barrière mécanique empêchant un contact entre le sol nu et la graine. C'est aussi un obstacle pour la captation des ressources, en particulier pour l'eau dans le cas des graminées. Des travaux complémentaires sont alors nécessaires. Des expérimentations ont été conduites par plusieurs organismes (Irstea, CRPF, ONF) ¹ sur différentes forêts (Barbentane, Saint-Cannat, Vaison-la-Romaine) pour tester l'influence de ces travaux sur la régénération du pin. Ils ont montré clairement que l'installation des semis est favorisée par des travaux de crocheting du sol après broyage de la végétation (traitement testé sur tous les sites) ou par un brûlage dirigé suffisamment intense (testé sur un seul site) alors que la régénération est très faible dans les témoins (Cf. Photos 3 et 4, PRÉVOSTO *et al.* 2012).

Le sylviculteur peut tirer parti de la phase de régénération pour favoriser les feuillus, afin d'obtenir des peuplements mélangés plus résilients face aux aléas permettant, par exemple, une restauration après feu plus rapide ou pour diminuer les risques face à des attaques d'insectes. Il peut aussi agir en

1 - IRSTEA : anciennement Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, regroupé aujourd'hui avec l'INRA au sein de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE).

CRPF : Centre régional de la propriété forestière.
ONF : Office national des forêts.

Photos 3 et 4 :

A gauche : peuplement issu de la coupe de régénération après broyage de la végétation et crocheting du sol.
A droite : régénération du pin d'Alep 16 ans après les travaux de crocheting du sol.
Photos C. Ripert, Irstea.



2 - UICN : Union internationale pour la conservation de la nature.

Photo 5 :
Diversification
par installation de feuillus
(ici un sorbier
domestique)
dans les peuplements
éclaircis de pin d'Alep.
Photo J.M. Lopez, Irstea.

ce sens avant cette phase dans les peuplements plus jeunes. Dans une expérimentation conduite sur le site de Saint-Mitre-les-Remparts, nous avons montré comment l'éclaircie des peuplements de 50-60 ans favorisait la survie et la croissance de divers feuillus méditerranéens plantés ou semés sous couvert du pin (Cf. Photo 5, PRÉVOSTO *et al.* 2016). A l'inverse sous couvert dense, l'installation de la régénération feuillue est compromise en raison de la combinaison d'un manque de lumière et de la sécheresse. Bien sûr, les pins sont les premiers bénéficiaires de l'éclaircie avec une croissance accrue et un risque de mortalité diminué. Si les peuplements ouverts sont donc les plus favorables, le développement d'une strate arbustive abondante limite cependant sur le plan hydrique les effets bénéfiques de l'éclaircie, principalement par les processus d'interception de la pluie et de la transpiration (PRÉVOSTO *et al.* 2018).



La gestion est donc un outil important en forêt méditerranéenne, traditionnellement sous-gérée, pour adapter la forêt au changement climatique et à ses conséquences. Pour les formations à pin d'Alep, elle peut agir principalement pour stimuler la régénération naturelle des peuplements, favoriser leur diversification et réduire la compétition intra-spécifique.

Conclusion

L'UICN² France, dans sa « Liste Rouge des Écosystèmes en France » de 2018, envisage ainsi le futur des pinèdes à pin d'Alep dans le sud de la France : « *Les pinèdes à pin d'Alep, dont l'expansion en France n'est limitée que par la neige et le gel, ne présentent actuellement pas de risques sérieux de dégradation. Au rythme actuel d'aridification du climat méditerranéen, ces dernières pourraient même devenir les dernières forêts composées de grands arbres de cette région, à moins de 600 mètres d'altitude...* » (UICN France, 2018). Nous ne pouvons qu'être d'accord avec cette analyse.

Le bois de pin d'Alep a été intégré dans la norme sur les règles d'utilisation du bois dans la construction (NF B52-001) en 2018. C'est une bonne nouvelle, qui n'est que justice et fait sens au vu de ses qualités technologiques et de son abondance. Néanmoins, pour que le pin d'Alep devienne une ressource forestière pleinement exploitable pour son bois d'œuvre, une véritable stratégie sylvicole reste à mettre en œuvre. Si on connaît bien les outils techniques permettant de gérer les pinèdes de pin d'Alep, il reste néanmoins à les appliquer notamment en fonction des critères économiques spécifiques au contexte méditerranéen (faible valorisation, morcellement des propriétés, etc.). Cette sylviculture devra nécessairement intégrer la perturbation comme mode de régénération, mais devra aussi mettre en balance des objectifs aussi variés que le risque lié aux incendies, en augmentation, les gains de productivité pour des objectifs variés (bois d'œuvre, biomasse, chimie verte, etc.), et la tentation de la monoculture face aux risques sanitaires et la nécessaire protection de la biodiversité. Enfin, et malgré son abondance, la ressource locale, une des plus résistantes aux froids hivernaux, doit faire l'objet d'une stratégie de conservation de ses ressources génétiques, actuellement inexistante en France.

Atteindre ces objectifs est possible avec un réel partage des connaissances et des données entre scientifiques, gestionnaires et propriétaires (FADY & SCOTTI, 2018). A ce titre, l'inscription de l'Infrastructure Nationale de recherche pour la gestion adaptative des forêts IN-SYLVA sur la feuille de route française des grandes infrastructures de recherches est un grand pas dans la bonne direction. Ce ne sera cependant faisable qu'avec un soutien institutionnel fort aux suivis et expérimentations de long terme, et à une filière de qualité maximisant les services écosystémiques.

Références

- Adams H. D., Zeppel M. J. B., Anderegg W. R. L., Hartmann H., Landhäusser S. M., Tissue D. T., ... McDowell N. G. (2017). A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution* 1(9): 1285–1291.
- Bariteau M., 1992. Variabilité géographique et adaptation aux contraintes du milieu méditerranéen des pins de la section *halepensis* : résultats (provisoire) des essais en plantations comparatives en France. *Forêt Méditerranéenne* XIII(3): 179-181.
- Bedia J., Herrera S., Camia A., Moreno J.M., Gutiérrez J.M., 2014. Forest fire danger projections in the mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios. *Climatic Change* 122: 185-199.
- Buras A., Menzel A., 2019. Projecting Tree Species Composition Changes of European Forests for 2061–2090 Under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios. *Frontiers in Plant Science* 9: 1986.
- Eckert A.J., Hall B.D., 2006. Phylogeny, historical biogeography, and patterns of diversification for *Pinus* (Pinaceae): Phylogenetic tests of fossil-based hypotheses. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 40: 166–182.
- Fady B., 2012. Biogeography of neutral genes and recent evolutionary history of pines in the Mediterranean Basin. *Annals of Forest Science* 69(4), 421-428.
- Fady B., Scotti I., 2018. Pour l'environnement et la forêt, le temps de l'expérimentation. *Forêt Entreprise* 240: 62-63.
- Fady B., Semerci H., Vendramin G.G., 2003. Technical guidelines for genetic conservation and use for Aleppo pine (*Pinus halepensis*) and Brutia pine (*Pinus brutia*). EUFORGEN, International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, 6p.
- Fargeon H., Pimont F., Martin-StPaul N., De Caceres M., Ruffault J., Barbero R., Dupuy J-L., 2020. Projection of fire danger under climate change over France: where do the greatest uncertainties lie? *Climatic Change*, <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02629-w>.
- Fernandes P.M., Vega J.A., Jiménez E., Rigolot E., 2008. Fire resistance of European pines. *Forest Ecology & Management* 256: 246–255.
- Fréjaville T., Curt T., 2015. Spatiotemporal patterns of changes in fire regime and climate: defining the pyroclimates of south-eastern France (Mediterranean Basin). *Climatic change*, 129: 239-251.
- Gernandt D.S., Geada López G., Ortiz-García S., Liston A., 2005. Phylogeny and classification of *Pinus*. *Taxon* 4: 29–42.
- Institut géographique national, 2018. Le Mémento Inventaire Forestier. Consultation du site web de l'Inventaire forestier national en 2019.
- Keeley J., 2012. Ecology and evolution of pine life histories. *Annals of Forest Science* 69: 445-453.
- Martin-StPaul N., Delzon S, Cochard H., 2017. Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. *Ecology Letters* 20:1437-1447.
- Mauri, A., Di Leo, M., de Rigo, D., Caudullo, G., 2016. *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayán, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. e0166b8+
- Médail F., Monnet A.C., Pavon D., Nikolic T., Dimopoulos P., Bacchetta G., Arroyo J., Barina Z., Cheikh Albassatneh M., Domina G., Fady B., Matevski V., Mifsud S., Leriche A., 2019. What is a tree in the Mediterranean Basin hotspot? A critical analysis. *Forest Ecosystems* 6: 17.
- Ne'eman G., Goubitz S., Nathan R., 2004. Reproductive traits of *Pinus halepensis* in the light of fire – a critical review. *Plant Ecology* 171: 69-79.
- Prevosto B., Amandier L., Quesney T., De Boisgelin G., Ripert C., 2012. Régénérer efficacement les peuplements de pin : des travaux souvent indispensables ! L'exemple des peuplements à pin d'Alep en zone méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne* XXXIII(4): 1-10.
- Prevosto B., Gavinet J., Ripert C., Esteve R., Guerra F., Lopez J.M., Travaglini C., 2016. Installer des feuillus méditerranéens pour augmenter la résilience et diversifier les peuplements résineux : rôle du couvert forestier et influence de l'espèce. *Forêt Méditerranéenne* XXXVII(3): 175-184.
- Prevosto B., Audouard M., Helluy M., Lopez J.M., Balandier P., 2018. Le bilan hydrique en forêt méditerranéenne : influence des strates et de leur gestion. Application au pin d'Alep. *Forêt Méditerranéenne* XXXIX(1): 1-10.
- Quézel P., Barbéro M., 1994. Le pin d'Alep et les espèces voisines : répartition et caractères écologiques généraux, sa dynamique récente en France méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne* XII(3): 158-170.
- Rigolot E., Amandier L., Duché Y., Prevosto B., Ripert C., Savazzi R., 2013. Le pin d'Alep et l'incendie - Sylviculture préventive. In: Bernard Prevosto, dir., *Le pin d'Alep en France. 17 fiches pour connaître et gérer* (p. 119-127). Guide Pratique. Versailles, FRA : Editions Quae.
- Simioni G., Marie G., Davi H., Martin-St Paul N., Huc R., 2020. Natural forest dynamics have more influence than climate change on the net ecosystem production of a mixed Mediterranean forest. *Ecological Modelling* 416: 108921 (<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108921>).
- UICN France, 2018. *La Liste Rouge des Écosystèmes en France* - Chapitre Forêts méditerranéennes de France métropolitaine, Paris, France.

Bruno FADY
Hendrik DAVI
Nicolas MARTIN-St
PAUL
Myriam MORENO
Eric RIGOLOT
Guillaume SIMIONI
INRAE, URFM,
Avignon

Bernard BOUTTE
Département Santé
des Forêts, Avignon

Bernard PREVOSTO
INRAE, RECOVER
Aix-en-Provence

Auteur
de correspondance :
bruno.fady@inrae.fr

Résumé

Le pin d'Alep : évolution, acclimatation et adaptation au changement climatique

Le pin d'Alep, *Pinus halepensis*, une des 110 espèces du genre *Pinus* dans le monde, occupe environ 3,5 millions d'hectares en région méditerranéenne. Parmi toutes les espèces forestières européennes, il est l'une de celles qui tolère le mieux la chaleur et le manque d'eau en été, du fait de sa forte résistance à la cavitation et de sa fermeture stomatique très efficace. Il est donc capable de continuer à stocker du carbone en conditions difficiles. Sa variabilité génétique est large mais les provenances locales sont de loin celles qui tolèrent le mieux les froids hivernaux, une des limites de l'expansion du pin d'Alep en latitude et altitude.

Le pin d'Alep forme les pinèdes parmi les plus vulnérables aux incendies, mais sa capacité à régénérer après feu lui confère l'une des meilleures résiliences connues. Les deux principaux problèmes phytosanitaires du pin d'Alep sont l'hylésine destructeur (*Tomicus destruens*) et la maladie chancreuse des rameaux (*Crumenulopsis sororia*). Hors incendie, le principal problème de gestion est le renouvellement des peuplements âgés qui nécessite une intervention pour contrôler la végétation compétitrice.

Le pin d'Alep semble bien un des gagnants du changement climatique. Pour qu'il devienne une ressource forestière pleinement exploitable, une véritable stratégie sylvicole intégrant la perturbation comme mode de régénération reste à mettre en œuvre.

Summary

The Aleppo pine: evolution, acclimatisation and adaptation to climate change

The Aleppo pine, *Pinus halepensis*, one of the 110 species of the *Pinus* genus in the world, occupies about 3.5 million hectares in the Mediterranean region. Among all European forest species, it is one of the most tolerant of heat and drought in summer thanks to its high resistance to cavitation and its highly effective stomatal closure. It is therefore capable of continuing to store carbon under difficult conditions. Its genetic variability is wide but the local provenances are by far the best at tolerating cold winters, one of the limiting factors in the extension of the Aleppo pine in latitude and altitude.

Aleppo pine forms some of the most fire-prone pine forests, but its ability to regenerate after wildfire makes it one of the most resilient species known. The two main phytosanitary problems of Aleppo pine are the destructive hylesin (*Tomicus destruens*) and canker disease in twigs (*Crumenulopsis sororia*). Apart from wildfire, the main management problem is the renewal of old stands, which requires intervention to control competing vegetation.

Aleppo pine seems to be one of the beneficiaries of climate change. In order for it to become a fully exploitable forest resource, a genuine silvicultural strategy integrating disturbance as a method of regeneration remains to be implemented.

Resumen

El pino carrasco, *Pinus halepensis*, una de las 110 especies del género *Pinus* en el mundo, ocupa alrededor de 3,5 millones de hectáreas en la región del Mediterráneo. Entre todas las especies forestales europeas, es una de las más tolerantes al calor y a la falta de agua en verano, debido a su alta resistencia a la cavitación y a su cierre estomacal altamente eficaz. Por lo tanto, es capaz de seguir almacenando carbono en condiciones difíciles. Su variabilidad genética es amplia pero las procedencias locales son, con mucho, las que mejor toleran los inviernos fríos, uno de los límites de la expansión del pino carrasco en latitud y altitud.

El pino carrasco forma algunos de los bosques de pino más propensos al fuego, pero su capacidad de regenerarse después de un incendio lo convierte en una de las especies más resistentes que se conocen. Los dos principales problemas fitosanitarios del pino carrasco son la hilesina destructiva (*Tomicus destruens*) y el chancro de las ramas (*Crumenulopsis sororia*). Aparte del fuego, el principal problema de gestión es la renovación de los antiguos rodales, lo que requiere una intervención para controlar la vegetación competidora.

El pino carrasco parece ser uno de los ganadores del cambio climático. Para que se convierta en un recurso forestal plenamente explotable, queda por aplicar una verdadera estrategia silvícola que integre la perturbación como modo de regeneración.