



Forêts et changement climatique : Le constat en région méditerranéenne

Michel Vennetier

► To cite this version:

Michel Vennetier. Forêts et changement climatique : Le constat en région méditerranéenne. Sciences Eaux & Territoires, 2020, 33, pp.18-25. 10.14758/SET-REVUE.2020.3.05 . hal-02872026

HAL Id: hal-02872026

<https://hal.inrae.fr/hal-02872026>

Submitted on 17 Jun 2020

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

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

Forêts et changement climatique

Le constat en région méditerranéenne

La région méditerranéenne est particulièrement concernée par le changement climatique pour deux raisons. D'une part, ce changement y est plus rapide que la moyenne mondiale, et cette tendance devrait s'accroître dans le futur. D'autre part, la combinaison d'une sécheresse marquée avec la saison la plus chaude est la principale composante définissant le climat méditerranéen. Elle constitue déjà la plus grande contrainte pour la végétation. Bien que cette végétation y soit adaptée, du moins dans les conditions du passé, les changements en cours risquent de l'aggraver au-delà de la résistance connue des plantes. Dans cet article, l'auteur fait le point des changements en cours et de leurs impacts sur les arbres, et au-delà sur tout l'écosystème forestier.

Les points clefs du climat et leurs effets sur la végétation

Le changement climatique actuel est un phénomène complexe sur la région méditerranéenne (Rossello *et al.*, 2016) : l'été s'y réchauffe plus vite que l'hiver (+ 0,5 °C contre + 0,2 °C par décennie), et pour chacune de ces saisons, les températures minimales journalières (+ 0,7 et + 0,3 °C) augmentent plus vite que les maximales (+ 0,25 et + 0,15 °C). Ces différences accentuent les effets néfastes pour la végétation. Le stress estival déjà très fort devient progressivement insupportable pour de nombreuses espèces. Mais l'augmentation plus rapide des minimales n'est pas non plus une bonne nouvelle. En été, les nuits très chaudes et l'absence de rosée ne permettent pas à la végétation de se réhydrater entre deux journées de canicule. En fin d'automne et en hiver, moins de froid conduit à un arrêt tardif de la croissance des végétaux, et à une reprise précoce dès la fin d'hiver, voire aucun arrêt pour certaines espèces [20]. En conséquence, on constate déjà une augmentation des risques de dégâts de gel lors des rares épisodes de froid intense qui sont inévitables, même s'ils sont très courts : d'une part en altitude [24], d'autre part dans la zone basse méditerranéenne

(Vennetier, 2018). Un hiver plus chaud, c'est aussi moins de neige sur les montagnes méditerranéennes [16], donc plus de ruissellement et moins de réserves en eau dans le sol, ce qui contrarie l'effet positif d'un démarrage avancé de la croissance [26]. L'utilisation plus précoce de la réserve d'eau du sol, et un besoin d'eau important à cause des températures plus élevées au printemps, conduisent à l'épuisement rapide de cette réserve. Ces deux phénomènes accentuent la durée et l'intensité de la sécheresse estivale, d'autant que les pluies d'été tendent à diminuer. Enfin, des séries inédites d'années sèches et très chaudes ont été enregistrées depuis vingt ans : cinq années successives de 2003 à 2007, trois années de 2015 à 2017, et l'année 2019 a battu de nouveaux records absolus pour le mois de juin (45,9 °C en Occitanie), conjugués avec une forte sécheresse.

Des projections du climat futur indiquent que le climat méditerranéen devrait gagner vers le nord l'équivalent de 25 à 50 % de sa surface actuelle selon les scénarios RCP4.5 and RCP8.5 respectivement [0], dans des zones où la végétation n'est pas adaptée à la sécheresse d'été, mais aussi perdre jusqu'à 16 % de cette surface côté sud au profit de zones arides et désertifiées.

❶ Le changement climatique a déjà des effets négatifs sur la plupart des composantes physiques et biologiques de la forêt méditerranéenne.



© M. Vennetier

En pratique, le changement climatique a déjà des effets, majoritairement négatifs, sur la plupart des composantes physiques et biologiques de la forêt méditerranéenne. Les principaux impacts sont détaillés ci-après.

Croissance des arbres et productivité des forêts

Au cours du vingtième siècle, la croissance des forêts méditerranéenne a augmenté progressivement, comme dans la plupart des forêts du monde : par exemple + 100 % de productivité pour le chêne blanc [12] et + 40 % pour la croissance en hauteur pour le pin d'Alep [22]. Ces changements s'expliquent entre autres par l'augmentation des températures, du taux de CO₂, des dépôts azotés, etc. L'allongement de la durée annuelle de croissance est visible dans le pourcentage de bois final des cernes de croissance (+ 15 à 20 % chez les pins) grâce à un polycyclisme¹ d'automne plus fréquent et plus marqué. Mais cette tendance s'est progressivement inversée, une vague de ralentissement gagnant du sud vers le nord. Les premiers signes sont apparus à la fin des années 1970 au Maghreb [4], avec le dépassement d'un seuil critique de stress hydrique en été, qui contrebalance tous les effets favorables observés précédemment. Elle a atteint désormais les limites nord du climat méditerranéen, jusqu'aux montagnes du Sud de la France. Si les vagues de chaleur et la répétition pluriannuelle de fortes sécheresses en sont les causes principales, le développement épidémique de maladies et parasites y contribuent également (cf. ci-après le chapitre « Santé des forêts »).

La croissance individuelle des arbres subit également des changements temporels : la croissance en hauteur et l'allongement des branches du pin d'Alep, par exemple, ne se sont plus arrêtés en hiver depuis 2010 et l'apparition des boutons floraux s'est avancée de deux à trois mois par rapport aux années 1970 [19]. À l'inverse, l'arrêt de croissance en été, pour les branches et le diamètre, est de plus en plus long, les arbres étant trop stressés pour reprendre rapidement leur croissance en automne.

Sur la croissance en diamètre, on a noté une multiplication des cycles intra-annuels chez de nombreuses espèces, que ce soit au milieu du printemps dans le cas de sécheresse en début d'année suivie par des pluies abondantes en mai-juin, ou en automne avec des alternances d'accélération et d'arrêts de croissance pilotées par l'évolution des pluies et températures [10]. Par rapport à la fin du vingtième siècle, en opposition avec la tendance passée, on note une réduction globale de la croissance automnale, notamment caractérisée par une diminution du pourcentage de bois final.

À cause de l'activité hivernale des rameaux, des dégâts de gels ont été observés à plusieurs reprises depuis 2010, notamment en 2012, quand des nécroses ont été notées sur beaucoup d'espèces, feuillus comme résineux (relevés Irstea, désormais INRAE). La floraison de printemps des plantes mellifères a été réduite de 50 à 80 % cette année-là. D'autres années, ce sont les champignons pathogènes qui ont tué, plus tard dans la saison de croissance, les rameaux dont les tissus avaient été partiellement lésés par le gel.

Santé et reproduction des arbres

L'impact des changements climatiques sur la santé des arbres se traduit à la fois par des dépérissements, notamment la défoliation partielle et des mortalités de branches, et par des mortalités parfois massives, ces deux phénomènes ayant des causes multiples et interactives (Landmann, 1994). Ils résultent d'une combinaison de stress climatiques, de conditions stationnelles défavorables, d'un peuplement trop dense ou inadapté à la sécheresse, et souvent de la pression d'agents biotiques (parasites, insectes, maladies). Ces derniers évoluent eux-mêmes avec le changement climatique : certains s'étendent en surface, ou deviennent beaucoup

1. Capacité d'une espèce végétale ou d'un axe (rameau, pousse, etc.) à produire plusieurs unités de croissance par an.

▶ plus abondants et agressifs, alors que d'autres montrent probablement une tendance inverse. De nouvelles menaces apparaissent, car le climat devient favorable à des espèces jusqu'alors limitées par le froid, et des introductions accidentelles comme la pyrale du buis ou plus anciennement la cochenille du pin maritime, conduisent à des mortalités massives à l'échelle régionale.

Le gui et la chenille processionnaire sont de bons exemples d'espèces favorisées par le changement climatique [2] [6] : espèces thermophiles, ils gagnent rapidement en altitude et vers le nord, et leur densité de

population augmente. Ils mettent maintenant en danger le pin sylvestre, mais aussi le pin noir, alors que dans le passé, ils n'avaient qu'un effet limitant et temporaire sur sa croissance. Manquant parfois de nourriture lors de ses dernières pullulations massives, la chenille processionnaire s'est attaquée à des espèces qu'elle délaissait habituellement, comme les sapins ou le cèdre. Une invasion inédite des cédraies d'altitude s'est en particulier produite en Algérie en 2015, plusieurs centaines de mètres au-dessus de sa limite connue précédemment.

De façon globale, on note une forte aggravation des dépérissements en forêt méditerranéenne : d'après le département « Santé des forêts », le taux moyen de défoliation sur le réseau systématique en région Sud est passé de 12,5 % en 1990 à 37 % en 2018 (figure ❶), avec des accélérations marquées sur de courtes périodes correspondant aux effets directs et différés des sécheresses fortes ou répétées, entrecoupées de périodes de stabilisation relative. Le cas particulier des principales espèces de la forêt méditerranéenne française est discuté ci-après.

Le chêne pubescent est l'espèce décidue la plus présente en forêt méditerranéenne française. Sa productivité a doublé au cours du vingtième siècle [12], traduisant sa parfaite santé à cette époque et son adaptation au climat passé. Son dépérissement a commencé au début du vingt-et-unième siècle avec la longue sécheresse de 2003 à 2007. En 2010, les houppiers compaient 30 % de branches mortes en Provence, mais en 2019, 60 % des arbres sont dépérissants (photo ❷), dont 16 % mourants [25]. Sa limite inférieure semble être remontée de plusieurs centaines de mètres en altitude, et de près de cent kilomètres vers le nord par rapport au vingtième siècle.

Le pin sylvestre est pour sa part le résineux le plus abondant de la région méditerranéenne française. Des dépérissements, apparus en Espagne tout d'abord dans les années 1990, sont remontés vers le nord jusqu'en Suisse dans les années 2000 [14]. En France, il a mal supporté les sécheresses de 2003 à 2007 [23] (photo ❸, cf. aussi les rapports du département « Santé des forêts », de 2003 à 2007), et surtout la canicule de l'été 2003 pendant laquelle certains arbres, à très basse altitude, sont directement morts de chaud (les aiguilles brûlées sur leur face supérieure). La mortalité a ensuite gagné les peuplements situés dans des situations favorables (sols profonds, versants frais, vallons, altitude élevée), où des arbres, peu habitués au stress hydrique, sont morts de soif entre 2004 et 2005 (cavitation des vaisseaux conducteurs de sève). Enfin, une troisième vague de mortalité a touché entre 2006 et 2010 les stations défavorables d'altitude basse à moyenne, sur sols superficiels ou en versant chaud : affaiblis par la succession de sécheresses ayant épuisé leurs réserves, ils sont morts de faim (manque de carbone pour subvenir à leur métabolisme et se défendre contre les attaques d'insectes et les champignons opportunistes). En 2018, une étude sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur [10] montre que 52 % des peuplements de pin sylvestre y sont dépérissants, avec un fort taux de mortalité récente (7 %). La productivité du pin sylvestre y a fortement diminué, depuis 1970 pour les arbres âgés, et depuis 2000 pour les plus jeunes. Outre les mauvaises conditions stationnelles, qui aggravent le stress clima-

❶ Évolution du déficit foliaire en forêt méditerranéenne de 1990 à 2008, toutes espèces confondues (source : Département Santé des Forêts).



❷ Le chêne blanc est capable de survivre longtemps avec un gros déficit foliaire, résultant d'une mortalité importante des branches, mais sa croissance est alors très faible. Son taux de mortalité est inférieur à celui d'autres espèces pour un niveau similaire de défoliation moyenne, les très vieux arbres et les plus gros individus situés dans les fonds de vallons étant les plus vulnérables.



⑤ Mortalité massive du pin sylvestre dans la haute vallée du Verdon suite à la sécheresse 2003-2007.

tique, l'abondance du gui et l'intensité des attaques de chenille processionnaire sont les principaux facteurs explicatifs de ces pertes de croissance, dépérissements et mortalités, accentués par des pathogènes de faiblesse. En région méditerranéenne, le dépérissement du sapin pectiné a commencé dans les Pyrénées espagnoles et en Italie dans les années 1980 [7]. Puis il est apparu vers 1990 dans les Alpes Maritimes, et s'est étendu après 2003 sur l'ensemble des montagnes méditerranéennes françaises. Dans la fin des années 2000, la mortalité atteignait 21 % des arbres dans certaines sapinières du Mont Ventoux, de l'Aude et des Pyrénées Orientales [11]. Bien que les versants chauds de basse altitude soient généralement les plus touchés, ce sont principalement les conditions stationnelles (profondeur du sol, texture, topographie) et l'enracinement qu'elles permettent qui sont déterminantes dans le dépérissement et la mortalité [1]. Les sapins situés dans des stations très favorables, ayant eu des croissances rapides dans le jeune âge sans développer d'enracinement profond, sont autant exposés que ceux ayant eu une croissance lente en raison des conditions locales difficiles. La sécheresse d'été est la principale contrainte sur sa croissance, expliquant son ralentissement depuis vingt ans. Le sapin exigeant une forte humidité relative de l'air, des coupes trop fortes dans le passé, suite aux premiers dépérissements, ont parfois accentué le phénomène sur le moyen terme. Le chêne vert est l'une des espèces arborées les plus résistantes à la sécheresse en forêt méditerranéenne

française. On le trouve majoritairement dans les stations difficiles, à basse altitude sur les versants chauds et sols superficiels, où il est moins concurrencé par des espèces à croissance plus rapide, et plus compétitives pour la lumière. Mais ces stations sont des pièges : avec le changement climatique, les conditions y dépassent sa tolérance au stress hydrique. Des dépérissements ont été constatés au début des années 1990, mais c'est surtout depuis 2003 que le processus s'est accéléré. En Provence en 2019, 65 % des peuplements inventoriés ont un déficit foliaire moyen supérieur ou égal à 50 %, en réponse à la sécheresse extrême de 2016 et 2017 [25].

Le pin d'Alep, premier résineux méditerranéen à basse altitude, est l'essence autochtone la plus résistante à la sécheresse. Mais son taux moyen de défoliation augmente avec le temps (40 % sur la Provence en 2019), bien qu'il montre, contrairement aux autres espèces principales, des périodes de rémission partielle. La sécheresse n'est pas seule en cause. Avec les automnes de plus en plus chauds, les années humides se traduisent par des attaques massives du chancre à *Crumenulopsis* [3], qui tue de nombreux jeunes rameaux : jusqu'à 80 % sur les branches basses en quelques années. S'y ajoutent les dégâts de gel, qui touchent les aiguilles et souvent des rameaux entiers, notamment en fin d'hiver, les jeunes pousses portant des fleurs mâles qui sont en pleine elongation, donc très vulnérables. Suite aux sécheresses de 2015 à 2017, des attaques de scolytes ont tué de nombreux pins d'Alep affaiblis, un risque qui pourrait augmenter dans l'avenir.

► Parmi les autres espèces durement touchées par les dépérissements en France, figure le chêne liège. En Provence siliceuse (Maures, Esterel), des suivis après la canicule et les incendies de 2003 [18] ont montré qu'il était particulièrement vulnérable lorsque les conditions stationnelles étaient défavorables (combinaison de sol superficiel, exposition chaude, basse altitude). Il avait été jadis favorisé sur ces stations en sous-étage du pin maritime, en deçà de son optimum naturel. La disparition de l'étage dominant protecteur, et l'intensification des sécheresses nous ont rappelé ses limites. La répétition d'incendies sur de courtes périodes, combinée avec la répétition des sécheresses (2003-2007) l'a aussi fragilisé dans les zones plus favorables, de même que dans les autres massifs français. Dans la plus grande suberaie de Tunisie en Kroumirie, le chêne liège a largement dépéri suite à une sécheresse historique entre 1988 et 1995 [17] et cette dégradation se poursuit, confirmant qu'il est menacé avec le changement climatique.

Le cèdre de l'Atlas n'est pas une essence autochtone en France, mais il a été largement introduit : il représente une alternative aux espèces moins méditerranéennes menacées par le changement climatique dans le sud de leur aire, comme le pin sylvestre ou le pin noir. Mais il est aussi proposé plus largement dans les régions de climat tempéré dont le futur sera plus sec et chaud en été. Des mortalités significatives lors des derniers épisodes

de sécheresse intenses, ainsi que l'échec de quasiment toutes les plantations à basse altitude, montrent qu'il convient de rester prudent car c'est une espèce montagnarde [8]. Pour preuve au Maghreb, dans son aire d'origine, la limite inférieure du cèdre est remontée de 200 mètres en quarante ans, avec, au-dessus de la zone de disparition, des pertes de 30 à 80 % sur les versants peu favorables à proximité du Sahara, et une forte baisse de sa productivité là où il survit [9] [15]. La tolérance du cèdre à la sécheresse réside essentiellement dans sa capacité à puiser l'eau en profondeur, et dépend donc de la capacité du sol à y stocker de l'eau et laisser pénétrer ses racines. De plus, le cèdre est sensible aux gelées tardives : il risque donc d'en souffrir plus fréquemment, comme le pin d'Alep, et une sélection génétique sur sa précocité de débourrement est nécessaire.

Pour la plupart des espèces citées ci-dessus, la baisse de croissance et de vitalité des arbres s'accompagne aussi d'une baisse sensible de leurs capacités de reproduction, ce qui compromet le renouvellement des peuplements. Les pins (d'Alep, pignon et sylvestre) montrent une réduction de 50 à 80 % des cônes arrivant à maturité lors des épisodes de sécheresse pluriannuelle, mais aussi une réduction du nombre de graines par cône et un allongement du temps de germination. Il arrive même qu'il n'y ait quasiment aucune graine viable certaines années [19]. Des suivis sur le chêne vert et le chêne kermès ont aussi confirmé une forte réduction du nombre de glands et de leur taille, compromettant leur capacité germinative et la survie des semis.

❶ Mortalité forte de jeunes pins d'Alep et de nombreuses espèces de la garrigue (romarin, cistes, ajoncs) sur la Côte Bleue (Bouches-du-Rhône) en 2016. Cette mortalité peut toucher parfois plusieurs hectares d'un seul tenant. Par endroits, 90 % des végétaux sont morts, seuls des pins et genévriers adultes ayant survécu.



© M. Vennetier

Biodiversité

Les dégâts de sécheresse ou de gel sur la végétation du sous-bois passent parfois inaperçus, alors qu'ils sont tout aussi importants que sur les arbres. Entre 1997 et 2008, près de 15 % de la flore du sous-bois a changé, les espèces exigeant de l'humidité disparaissant ou réduisant leur recouvrement au profit d'espèces plus résistantes à la sécheresse et à la chaleur. Les changements ont été d'autant plus importants que les sites étaient plus mésophiles, tandis que les stations défavorables étaient peu touchées (Vennetier *et al.*, 2010 ; [5]). Cela s'explique par la vulnérabilité des plantes poussant dans des milieux qui, jusqu'alors, compensaient la sécheresse climatique par un bilan hydrique local favorable, n'imposant pas d'enracinement lointain ou profond. Avec le changement climatique, un premier seuil critique a été franchi : les conditions locales ne compensent plus entièrement le déficit hydrique estival. Sur les stations xérophiiles, les plantes déjà habituées à un stress hydrique annuel ont mieux résisté. Par contre, suite aux sécheresses répétées et records de chaleurs de 2015 à 2017, des dépérissements importants se sont produits dans les milieux xérophiiles le long de la côte [21] (photo ❶). Ils montrent que l'on a franchi un nouveau seuil critique, au-delà duquel même les espèces locales réputées très résistantes sont vulnérables, dans les stations actuellement les plus chaudes et sèches du Sud de la France.

Les sécheresses et les gels tardifs réduisent parfois considérablement la floraison. Les conséquences peuvent être dramatiques sur les pollinisateurs, ce qui entraîne en retour une baisse de la reproduction. Avec la baisse de la

productivité végétale et la raréfaction/disparition de certaines espèces, c'est aussi toute la chaîne alimentaire qui pourrait être impactée, des herbivores de toutes tailles aux carnivores qui en dépendent (Venetier, 2018).

Fertilité des sols et incendies

Les principaux acteurs de la vie des sols sont aussi soumis à la sécheresse sur des périodes de plus en plus longues, ce qui réduit leur temps d'activité et leurs abondances. La faune et microfaune du sol, notamment les vers de terre, les champignons et les bactéries sont concernés. Le sol moins travaillé par leur activité, donc moins poreux et moins structuré, perd partiellement sa perméabilité et sa capacité de rétention de l'eau [18], limitant la productivité végétale. Cette végétation réduite restitue moins de matière organique au sol, ce qui dans un cercle vicieux, contribue aussi à limiter l'activité biologique et la qualité du sol. Toute la chaîne trophique perd donc en vitalité et en diversité.

Plus de sécheresse et de canicule augmente directement le nombre de jours à risque élevé d'incendie. Ces mêmes sécheresses produisent, comme on l'a vu précédemment, de grosses quantités de biomasse morte très combustible dans la canopée et dans le sous-bois. L'intensité potentielle de ces incendies augmente, et donc leur effet destructeur pour la végétation et pour le sol. La continuité du combustible sur de grandes surfaces avec l'abandon des terres agricoles, et sa densification dans les nombreuses forêts non gérées, induisent un risque de feux de grande ampleur.

Les incendies causés par la sécheresse sont des processus communs et naturels en forêt méditerranéenne, mais une interaction nouvelle apparaît : les sécheresses pluriannuelles rendent les populations moins résistantes et moins résilientes au feu, et l'augmentation de la fréquence des feux rend la forêt et les sols moins résistants à la sécheresse.

Les enjeux du futur

Le bilan hydrique est le point clef de la réponse des forêts méditerranéennes au changement climatique. Or, sauf très localement, on ne peut changer ni la quantité d'eau apportée par la pluie, ni les conditions locales de sol et de topographie qui régulent la distribution et le stockage de cette eau dans le sol. Les seules options consistent donc à réguler la consommation d'eau par la végétation et l'évaporation en jouant sur la composition, la structure et la densité de la forêt.

Pour cela, trois solutions complémentaires sont possibles : éclaircir, rajeunir, diversifier :

- éclaircir, car on réduit ainsi la consommation d'eau et la compétition entre arbres et plus généralement entre végétaux. L'éclaircie a déjà fait ses preuves dans quasiment tous les écosystèmes forestiers du monde pour limiter les dépérissements (Sohn *et al.*, 2016) ;
- rajeunir, car les vieux arbres sont plus vulnérables et moins résilients que les jeunes, qui ont une capacité d'adaptation morphologique et physiologique aux conditions futures. La sélection naturelle dans les régénérations favorise aussi, directement, les génotypes les plus efficaces dans l'utilisation en eau ;
- diversifier, enfin, car l'amplitude du changement climatique futur est inconnue, ses conséquences indirectes (maladies, parasites...) imprévisibles, parce qu'il est dangereux de « mettre tous ses œufs dans le même panier » et que les mélanges d'espèces ayant des stratégies différentes d'enracinement et de consommation d'eau sont, parfois, plus résilients.

Enfin, il est nécessaire d'intensifier le suivi de l'état de santé et de la croissance des forêts, afin d'observer et quantifier l'adaptation des milieux et des espèces, de détecter des problèmes inattendus, et d'adapter la gestion à leur évolution réelle. ■

L'auteur

Michel VENNETIER

Aix Marseille Univ, Irstea, UR RECOVER,
13182 Aix-en-Provence, France.

michel.vennetier@irstea.fr

Remerciements

Certains résultats mentionnés dans cet article viennent de travaux ayant bénéficié de divers soutiens financiers :
Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB – www.fondationbiodiversite.fr), réseau AForce (projet Sylforclim), Agence nationale de la recherche (projet Drought+), Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, Irstea, Conservatoire du littoral (projet Romarin), Union européenne (projet IRISE).

EN SAVOIR PLUS...

■ LANDMANN, G., 1994, Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers, *Revue Forestière Française*, (XLVI) 5: 405-415.

■ ROSSELLO, P., BIDEY, Y., BRICHE, E., CARREGA, P., DEMARQUE, C., DUBOIS, G., GIRAUD, X., GUIOT, J., MARTIN, N., YOHIA, C. eds., 2016, *Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, AIR PACA, Marseille.

■ SOHN, J.A., SAHA, S., BAUHUS, J., 2016, Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis, *For. Ecol. Manag.*, n° 380, p. 261-273.

■ VENNETIER, M., 2018, Changement climatique et forêt méditerranéenne : quels impacts actuels et futurs sur la grande faune ?, *Forêt Méditerranéenne*, (34) 2, p. 77-86.

■ VENNETIER, M., RIPERT, C., 2010, Flore méditerranéenne et changement climatique : la course-poursuite est engagée, *Forêt Méditerranéenne*, (XXXI) 1, p. 15-24.

BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE...

Les numéros correspondent aux [renvois] dans le texte.

- [0] BARREDO, J.-I., MAURI, A., CAUDULLO, G., DOSIO, A., 2018, Assessing Shifts of Mediterranean and Arid Climates Under RCP4.5 and RCP8.5 Climate Projections in Europe, *Pure and Applied Geophysics*, (175) 11, p. 3955-3971.
- [1] CAILLERET, M., 2011, *Causes fonctionnelles du dépérissement et de la mortalité du sapin pectiné en Provence*, PHD Dissertation, École doctorale Sciences de l'Environnement, URFM – UR629 – INRA Avignon, Université Paul-Cézanne – Aix-Marseille III.
- [2] DOBBERTIN, M., HILKER, N., REBETEZ, M., ZIMMERMANN, N.-E., WOHLGEMUTH, T., RIGLING, A., 2005, The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album ssp austriacum*) in Switzerland – the result of climate warming?, *Int. J. Biometeorol.*, (50) 1, p. 40-47.
- [3] DSF, 2015, *Le dessèchement des rameaux de pin d'Alep dû à *Crumenulopsis sororia*, agent de la maladie chancreuse du pin d'Alep*, DRAAF PACA, 2 p., disponible sur : http://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/no78-CRUMSOR_PIN_ALEP_cle43a521.pdf
- [4] EL KHORCHANI, A., GADBEN-HENRY, C., BOUZID, S., KHALDI, A., 2007, Impact de la sécheresse sur la croissance de trois espèces forestières en Tunisie (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinea* L. et *Pinus pinaster* Sol.), *Sécheresse*, (18) 2, p. 113-121.
- [5] FICARA, L., 2019, *Évolution de la biodiversité végétale forestière sous l'effet du changement global en région méditerranéenne française*, Mémoire de Master 2, Université de Lorraine, Irstea, 35 p.
- [6] GAUDRY, J., LAUBRAY, S., 2018, *Le front d'expansion de la chenille processionnaire du pin progresse toujours*, Ministère de l'agriculture, Département Santé des Forêts, 4 p.
- [7] GAZOL, A., CAMARERO, J.-J., GUTIERREZ, E., POPA, I., ANDREU-HAYLES, L., MOTTA, R., NOLA, P., RIBAS, M., SANGUESA-BARREDA, G., URBINATI C., CARRER M., 2015, Distinct effects of climate warming on populations of silver fir (*Abies alba*) across Europe, *J. BIOGEOGR.*, (42) 6, p. 1150-1162.
- [8] COURBET, F., LAGACHERIE, M., MARTY, P., LADIER, J., RIPERT, C., RIOU-NIVERT, P., HUARD, F., AMANDIER, L., PAILLASSA, E., 2012, *Le cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandations*, RMT AForce, disponible sur : <https://prodirna.inra.fr/ft?id={AD0C5978-137F-41C1-A0E0-E6E406EB2301}>
- [9] LINARES, J.-C., TAÏQUI, L., CAMARERO, J.-J., 2011, Increasing drought sensitivity and decline of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan middle atlas forests, *Forests*, (2) 3, p. 777-796.
- [10] MARTY, P., VENNETIER, M., LEMAIRE, J., PONCET, M., H.P., JOURDAN, A., 2018, *Forêts méditerranéennes et alpines face aux changements climatiques : le cas du pin sylvestre en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, CNPF, Irstea, IDF, Marseille, France, 83 p.
- [11] NOURTIER, M., 2011, *La vulnérabilité du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) à la sécheresse en milieu méditerranéen selon les propriétés hydriques du sol*, Université d'Avignon, INRA, Thèse de doctorat, Université d'Avignon, Avignon.
- [12] RATHGEBER, C., GUIOT, J., ROCHE, P., TESSIER, L., 1999, Augmentation de productivité du chêne pubescent en région méditerranéenne française, *Ann. For. Sci.*, (56) 3, p. 211-219.
- [14] REBETEZ, M., DOBBERTIN, M., 2004, Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps, *Theor. Appl. Clim.*, (79) 1-2, p. 1-9.
- [15] RHANEM, M., 2011, Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) aux confins de la plaine de Midelt (Maroc), *Physio-Géo*, (5), p. 143-165.
- [16] SPANDRE, P., FRANÇOIS, H., VERFAILLIE, D., LAFAYESSE, M., DÉQUÉ, M., ECKERT, N., GEORGE, E., MORIN, S., 2019, *Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts*, Scientific Reports: www.nature.com/articles/s41598-019-44068-8
- [17] TOUHAMI, I., CHIRINO, E., AOUINTI, H., EL KHORCHANI, A., ELAIEB, M.-T., KHALDI, A., NASR, Z., 2019, Decline and dieback of cork oak (*Quercus suber* L.) forests in the Mediterranean basin: a case study of Kroumirie, Northwest Tunisia, *Journal of Forestry Research*: in press.
- [18] VENNETIER, M., CECILLON, L., GUÉNON, R., SCHAFFHAUSER, A., VERGNOUX, A., BOICHARD, J.-L., BOTTÉRO, J.-Y., BRUN, J.-J., CARRARA, M., CASSAGNE, N., et al., 2008, *Étude de l'impact d'incendies de forêt répétés sur la biodiversité et sur les sols : recherche d'indicateurs*, Rapport final, Cemagref, Ministère de l'Agriculture et de la pêche, Union Européenne, 238 p.
- [19] VENNETIER, M., ESTEVE, R., GARCIN, R.-M., GRIOT, S., RIPERT, C., VILA, B., 2001, *Dynamique spatiale de la régénération des forêts après incendie en basse Provence calcaire: cas particulier du pin d'Alep*, 51 p.
- [20] VENNETIER, M., GIRARD, F., DIDIER, C., OUARMIM, S., RIPERT, C., ESTÈVE, R., MARTIN, W., N'DIAYE, A., MISSON, L., 2011, Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique, *Forêt Méditerranéenne*, (32) 2, p. 151-166.
- [21] VENNETIER, M., GUERRA, F., ESTÈVE, R., LOPEZ, J.-M., TRAVAGLINI, C., AUDOUARD, M., ROCHE, P., 2017, *Gestion et restauration de la qualité des peuplements de romarin sur le site de la Côte Bleue du Conservatoire du Littoral au profit des pollinisateurs sauvages*, Irstea Aix-en-Provence, 21 p., disponible sur : <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00061626>
- [22] VENNETIER, M., RIPERT, C., BROCHIERO, F., CHANDIOUX, O., 1999, Évolution à court et long terme de la croissance du pin d'Alep en Provence. Conséquence sur la production de bois, *Forêt méditerranéenne*, (tome XX), 4, p. 147-156.
- [23] VENNETIER, M., THABEET, A., GADBEN HENRI, C., RIPERT, C., PRÉVOSTO, B., BORGNIE, L., VILA, B., GUIBAL, F., CARAGLIO, Y., REY, R., BURON, V., ZANETTI, C., 2007, Conséquences de la canicule et de la sécheresse 2003 sur les pins méditerranéens, in: *Sécheresse et canicule 2003, contribution des dispositifs de suivi et d'observation des forêts à la quantification des effets immédiats et à court terme*, Quae, Versailles, p. 15.
- [24] VITASSE, Y., SCHNEIDER, L., RIXEN, C., CHRISTEN, D., REBETEZ, M., 2018, Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades, *Agricultural and Forest Meteorology*, (248), p. 60-69.
- [25] VUILLERMET, F., 2019, *Dépérissement de la végétation et production de biomasse morte des forêts méditerranéennes françaises : Rôle des conditions topographiques et climatiques*, Mémoire de Master 2, Université de Nice-Sophia-Antipolis, Irstea, 50 p.
- [26] ZHANG, X., MANZANEDO, R.-D., D'ORANGEVILLE, L., RADEMACHER, T.-T., LI, J., BAI, X., HOU, M., CHEN, Z., ZOU, F., SONG, F., PEDERSON, N., 2019, Snowmelt and early to mid-growing season water availability augment tree growth during rapid warming in southern Asian boreal forests, *Glob. Change Biol.*, in press, <https://doi.org/10.1111/gcb.14749>



*Mortalité massive du pin sylvestre dans la haute vallée
du Verdon suite à la sécheresse 2003-2007.*