



HAL
open science

Les forêts méditerranéennes face au changement climatique. Quelles leçons pour celles de la Sainte-Baume

Michel Vennetier

► To cite this version:

Michel Vennetier. Les forêts méditerranéennes face au changement climatique. Quelles leçons pour celles de la Sainte-Baume. Forêt Méditerranéenne, 2023, 44 (2), pp.93-108. hal-04261287

HAL Id: hal-04261287

<https://hal.inrae.fr/hal-04261287>

Submitted on 26 Oct 2023

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.

Les forêts méditerranéennes face au changement climatique

Quelles leçons pour celle de la Sainte-Baume ?

par Michel VENNETIER

***Cet article détaille magistralement
les multiples effets néfastes
des dérèglements climatiques
sur toutes les composantes
physiques et fonctionnelles
des forêts méditerranéennes.
Le massif de la Sainte-Baume
n'échappe pas à la règle.***

Le changement climatique (Cf. Fig. 1) est devenu, depuis 20 ans, l'une des préoccupations majeures des forestiers dans le monde entier. Il a en effet de nombreuses conséquences néfastes, directes ou indirectes, sur le fonctionnement de tous les écosystèmes forestiers : de l'équateur au cercle polaire, des zones les plus humides aux régions semi-désertiques. En 2010, ALLEN *et al.* estimaient que les dépérissements forestiers avaient été multipliés par 4 en 20 ans, et ces phénomènes se sont confirmés et fortement accélérés depuis, n'épargnant aucun continent. La région méditerranéenne est une des plus affectées par le réchauffement climatique (Cf. Fig. 2) dans le monde. Ses écosystèmes, notamment ses forêts, bien qu'adaptés aux contraintes de canicules et sécheresses fréquentes, peuvent être fortement impactés.

La « forêt de la Sainte-Baume », terme générique qu'on focalise habituellement sur la forêt sacrée, forêt relique... est exceptionnelle par sa flore originale et son histoire, et notamment par sa célèbre hêtraie. Elle a fait l'objet de nombreuses études depuis plus d'un siècle, qui ont abouti à un statut de forêt d'exception, à des mesures de protection spécifiques, et à une gestion très conservatrice. Relique d'une époque plus froide, survivante de la période de migration vers le nord des écosystèmes après les glaciations (Cf. article p. 71), protégée depuis plus d'un millénaire grâce à sa proximité avec un site religieux d'importance majeure, elle est enclavée dans un milieu globalement beaucoup plus chaud et sec. Très loin géographiquement de toute autre zone qui lui corresponde, elle ne possède aucune échappatoire pour migrer, que ce soit en altitude ou en latitude, si le climat venait à lui être trop défavorable. Elle est donc en sursis, et menacée à moyen terme.

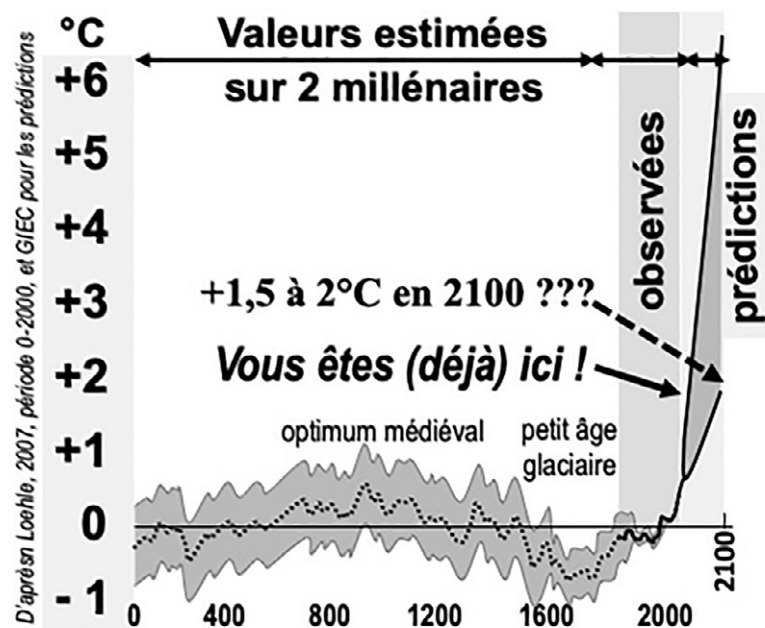


Fig. 1 :
Variations climatiques estimées ou observées sur les deux derniers millénaires sur l'hémisphère nord, et celles prédites par les modèles au XXI^e siècle. Pour les valeurs estimées du passé on affiche leur intervalle de confiance. Pour les prédictions, l'incertitude dépend des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. La flèche pleine indique la situation actuelle en régions méditerranéennes. La flèche pointillée est l'objectif (irréaliste !) des accords politiques internationaux signés (COP 21 et suivantes).

Cet article passe en revue les effets du changement climatique, majoritairement négatifs, sur toutes les composantes des milieux forestiers, et détaille plus précisément comment ils affectent les milieux méditerranéens. Il en tire les conséquences particulières pour les forêts du massif de la Sainte-Baume et pour ses espèces dominantes, confirmées par des études locales. Notamment bien sûr le hêtre dans la forêt sacrée, mais aussi le chêne pubescent, très présent dans la forêt relique et les versants, et les autres espèces dominantes du massif : le pin sylvestre (qui domine avec le chêne pubescent les hauts de versants, de part et d'autre de la hêtraie), et le pin d'Alep et le chêne vert qui se partagent l'essentiel du versant sud et le milieu et le bas du versant nord. Plus largement, les effets sur la flore dans son ensemble, la biodiversité et le sol, ainsi que sur certains services écosystémiques, sont abordés.

Vitesse et intensité du dérèglement climatique en région méditerranéenne

Depuis deux décennies, l'ampleur de ce changement dépasse largement les variations historiques qui peuvent être attribuées, au cours des derniers millénaires, à des phénomènes essentiellement naturels.

L'amplitude de l'optimum médiéval (environ du VIII^e au XII^e siècle) dans l'hémisphère

nord est sujette à une certaine incertitude, variable suivant les méthodes d'analyse chimiques ou biologiques utilisées, et en raison du très petit nombre de documents écrits détaillés. Son existence et son ampleur significative sont cependant attestées par des faits historiques indiscutables (installation des vikings et de l'élevage au Groenland, remontée de la culture de la vigne jusqu'au nord de l'Europe, absence de récits d'hivers extrêmes ou de glace massive sur les fleuves en hiver...). D'autant que les dates de ses principales variations concordent entre toutes les méthodes utilisées.

Le petit âge glaciaire qui l'a suivi est mieux documenté par de multiples sources écrites et graphiques détaillées. Il a fortement impacté les sociétés en raison d'années de froids extrêmes prolongés : Rhône pris par la glace à Avignon !, traversée possible des grands fleuves de tout le nord de la France et de l'Europe centrale par des chariots sur la glace durant des semaines ou des mois, grandes famines liées à des années « sans été » et très humides, abandon du Groenland, recul sensible des dates de vendange, etc. Il s'explique bien par différents phénomènes concomitants : activité solaire faible, plusieurs éruptions volcaniques cataclysmiques dans le monde sur une courte période, modification de la circulation océanique. Pour certains, s'y ajouterait la disparition de 90% ou plus des très nombreuses populations des Amériques après la conquête européenne. Cette baisse drastique et à grande échelle de l'activité humaine aurait conduit à une forte ré-expansion des forêts et prairies jadis défrichées sur ces continents, et donc à la recapture d'une forte quantité de CO₂. Cette dernière hypothèse fait le parallèle avec l'actuel effet inverse des défrichements massifs de forêts. On comprend bien que cette longue période ait été favorable au maintien, et même au renforcement de la hêtraie, dans le microclimat froid au pied côté nord de la falaise de la Sainte-Baume.

Quelles que soient les incertitudes sur le climat passé, le réchauffement récent, notamment depuis 1960, dépasse déjà les plus fortes variations de température moyenne annuelle estimées sur les 8000 dernières années. En particulier l'écart maximal qui sépare l'optimum médiéval du petit âge glaciaire (GREC PACA 2016). La projection optimiste d'une limitation du réchauffement global à + 1,5 à 2°C d'ici 2100, encore évoquée dans certains discours politiques, est clairement irréaliste.

Autour de la Méditerranée, le réchauffement climatique est encore plus rapide que dans la plupart des autres régions du monde (Cf. Fig. 1 et 2). En raison des contraintes spécifiques du climat méditerranéen, dans lequel une sécheresse marquée accompagne les températures d'été déjà critiques, cette évolution pourrait se révéler très néfaste pour les écosystèmes et, parmi les espèces, pour celles qui se trouvent déjà en limite inférieure de leur aire de distribution (Cf. p. 99).

Si la température moyenne annuelle est un indicateur fort des grandes tendances du climat, il faut en décliner les composantes saisonnières, et les différences entre valeurs maximales et minimales. Il faut aussi en extraire en détail les extrêmes et leur fréquence, car ce sont eux qui sont souvent à l'origine des dégâts et désordres sur la végétation, sur la faune, et bien sûr sur la vie des hommes. Et on doit mettre en parallèle l'évolution des températures, celle des pluies, et leurs interactions.

Les températures d'été ont ainsi augmenté de 0,5°C par décennie sur les 40 dernières années en région méditerranéenne française, et sont donc sur une trajectoire d'au moins +5°C sur le XXI^e siècle. On s'attend ainsi à dépasser régulièrement les 50°C en été à basse altitude (record actuel 45,9°C), et 45°C en arrière-pays. Au niveau journalier, les températures minimales d'été augmentent plus vite que les maximales : ce n'est pas une bonne nouvelle, car cela signifie que les nuits, très chaudes et sans rosée, ne permettent plus à la végétation de se réhydrater et de « souffler », cette chaleur nocturne entrant dans la définition même des canicules. Bien que les températures d'hiver augmentent moins vite que celles d'été (+0,2 à 0,3°C par décennie), elles aussi battent régulièrement des records absolus depuis 2015. Il en résulte une forte réduction des jours de gel, et des problèmes sérieux de dérèglement du cycle de vie des végétaux et animaux.

Si la pluviométrie annuelle n'a que peu évolué sur ces quarante dernières années dans le sud-est de la France (pas de tendance dans l'arrière-pays, très légère baisse en régions côtières), ce total est un mauvais indicateur. Car c'est plutôt la répartition des pluies qui est importante pour ces écosystèmes. Or la fréquence des années sèches a augmenté, comme le nombre de jours successifs sans pluie, ainsi que la fréquence des pluies extrêmes provoquant du ruissellement (RIBES *et al.* 2018). Ces pluies intenses, tom-

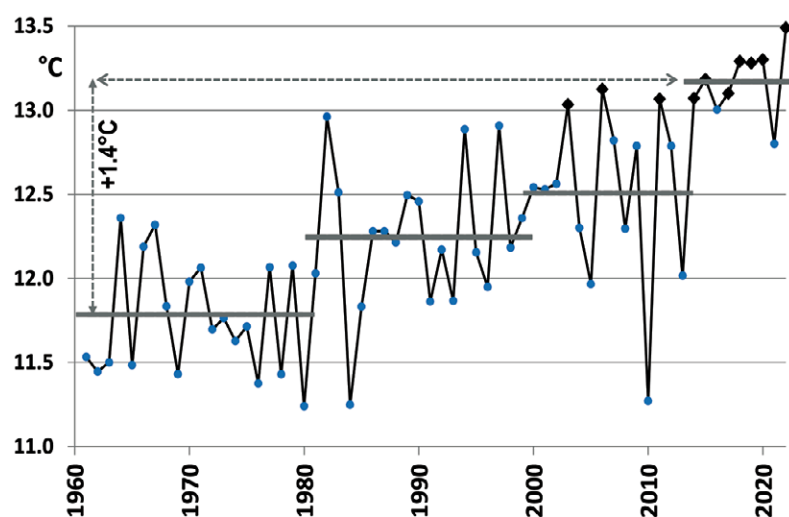


Fig. 2 : Evolution des températures dans le massif de la Sainte-Baume depuis 1960 (interpolée à partir des stations météo des alentours et de Plan d'Aups). On note une montée par paliers. Les dix années les plus chaudes (losanges) se situent toutes dans les 20 dernières, et 5 des plus chaudes dans les 6 dernières. Neuf des 10 dernières années dépassent les plus chaudes de la période 1960-2000. Le dernier palier, démarré en 2014, se situe à 1,4°C au-dessus de la moyenne 1960-1980, et près des 2°C au-dessus du début du XXI^e siècle. L'année 2022 bat un nouveau record, très au-dessus du dernier palier. Il est donc illusoire de penser que le climat méditerranéen ne franchira pas largement le cap des 2°C, et ce sera avant le milieu du XXI^e siècle !

bant surtout en automne, tendent à regonfler le total annuel de précipitations, déficitaire par ailleurs. Mais elles diminuent la quantité d'eau « utile » s'infiltrant dans le sol, sans parler des dégâts d'érosion. La quantité de neige et le nombre de jours de neige diminuent aussi rapidement en montagne, en lien avec les températures en hausse, posant de sérieux problèmes pour le débit des sources et rivières au printemps et en été, et l'approvisionnement en eau des activités humaines. De plus les sécheresses d'hiver se multiplient, et celles de printemps s'accroissent : elles limitent les réserves en eau du sol pour la croissance de printemps, qui représente l'essentiel de la production végétale en région méditerranéenne. Le sud-est méditerranéen est ainsi de loin la région française la plus touchée par la baisse de la quantité d'eau disponible dans le sol sur les dernières décennies. Et si les modèles climatiques peinent à prédire la quantité de pluie annuelle dans le futur, ils s'accordent sur le fait que la baisse de pluviométrie sera corrélée à l'augmentation des températures, ce qui constitue une « double peine » pour les écosystèmes.

Une tendance identique à l'augmentation, de 3,5 à 4,5% par an, est d'ailleurs observée depuis 40 ans pour le nombre de jours de combinaisons canicule-sécheresse, les canicules ou sécheresses seules, et les valeurs extrêmes de pluies (excès ou déficit) ou de températures, en toutes saisons.

En combinant les évolutions de pluviométrie et de températures, le nombre de jours de stress pour les écosystèmes a augmenté de 140 à 180% sur ces quatre dernières décennies en zone méditerranéenne.

Particularité de la « forêt sacrée » de la Sainte-Baume

La « forêt sacrée » de la Sainte-Baume, célèbre pour son majestueux peuplement de hêtre, est un écosystème original, relique de la remontée vers le nord des espèces végétales après la dernière glaciation. Elle a survécu grâce à la combinaison de facteurs naturels et sociaux exceptionnellement favorables :

- un microclimat très frais, créé par le versant nord en pente forte, combiné à la haute falaise qui le domine, limitant l'énergie solaire reçue ;

- une protection de longue durée liée au caractère sacré du site, évitant son défrichage et sa surexploitation prolongée, même si des périodes de turbulence ne l'ont pas épargnée des coupes de bois (Cf. articles p. 109 et p. 119).

Le bas du versant, plus accessible, a été moins préservé sur le long terme, les conditions naturelles ne pouvant expliquer à elles seules la transition assez abrupte entre le chêne et le hêtre à mi-versant (BAUBY, 1930). De même, la présence de sols dégradés sous des peuplements actuellement très âgés, et de sols forestiers très évolués sous des peuplements actuellement dégradés (BONIN *et al.* 1983a) témoignent de variations spatiales du couvert forestier et de perturbations significatives à des époques plus ou moins lointaines. BONIN *et al.* (1983b, 2015), sur la base d'une analyse phytosociologique, suggèrent aussi que la présence de semis de hêtre et de plusieurs espèces apparentées à la hêtraie (tilleul à grande feuille, érable à feuille d'aubier) dans le haut de cette chênaie, pouvait traduire la reconquête vers le bas du versant de la hêtraie ou d'une hêtraie-chênaie mixte formant le stade ultime (climax) de la dynamique naturelle.

Les dernières coupes massives, juste après la révolution, ont conduit à une régénération abondante du hêtre et du chêne pubescent, qui ont formé le fond du peuplement actuel, très âgé. Les forestiers ont ensuite géré ces peuplements par des coupes d'éclaircie et sanitaires, tout en conservant les vieux arbres encore vivants et en bonne santé. Une partie des peuplements a plus récemment été laissée en libre évolution. Alfred DUGELAY (1958) notait déjà le souci provoqué par le vieillissement de la hêtraie. Faisant une synthèse des inventaires réalisés par des forestiers de la fin du XIX^e siècle au milieu

du XX^e, il lui semblait clair que nombre des plus vieux et gros hêtres, héritage d'avant la révolution, étaient morts entre temps ; ils avaient été remplacés progressivement, parfois depuis longtemps, par la croissance de plus jeunes nés dans les trouées, et déjà assez gros et hauts. Il notait aussi l'invasion de la hêtraie par les ifs, et l'importante régénération par endroits d'autres espèces, dont les érables, ormes et tilleuls. Cependant, jusqu'à la fin du XX^e siècle, le cœur de la forêt restait un peuplement très dense dominé par de gros et vieux hêtres ou chênes, souvent plus que centenaires. Il assurait une ombre quasi-continue.

De façon plus générale, il faut aussi situer la « forêt sacrée » dans l'ensemble du massif forestier de la Sainte-Baume, certes moins original et plus anthropisé mais bien plus étendu, car les autres espèces dominantes de ce massif méritent l'attention et pourraient fortement interférer, dans le futur, avec le cœur préservé.

Effet des stress climatiques sur les arbres et la composition floristique

Sous l'effet de la canicule de 2003, combinée avec la série d'années très sèches entre 2003 et 2007, la mortalité des vieux hêtres s'est accélérée dans la forêt de la Sainte-Baume. Ces dépérissements se sont accentués par la suite, et le peuplement s'est fortement éclairci. Cette tendance se poursuit jusqu'à maintenant, en 2022, suite aux années sèches et particulièrement chaudes (Cf. Fig. 2) qui se succèdent depuis 2015 dans cette région. Les hêtres ont presque tous des houppiers très clairs, qui contrastent avec la canopée dense décrite dans le passé, et la lumière envahit les sous-bois. Les vieux chênes pubescents en bas de versant, qui subissent une mortalité moins forte que les hêtres mais significative, ont également des houppiers dégradés et clairs, traduisant un dépérissement rapide. Cette espèce, qui avait pourtant doublé sa productivité au cours du XX^e siècle en région méditerranéenne française (RATHGEBER *et al.* 1999), a subi un très brusque retournement de tendance depuis 20 ans.

Si les gestionnaires peuvent estimer les mortalités récentes dans la « forêt sacrée », on ne dispose pas d'une étude détaillée sur le

moyen terme de l'évolution de l'état sanitaire des hêtres et grands chênes, ni de leur croissance. Mais pour le hêtre et pour la période entre 1900 et 2010, on peut faire le parallèle avec l'évolution de ces paramètres sur le pin sylvestre. Car lui aussi est en limite inférieure de son aire de répartition et en situation de peuplements « reliques » dans le massif de la Sainte-Baume, dont il occupe les hauts de versants en dehors de la hêtraie. VILA *et al.* (2008) ont noté que le pin sylvestre avait vu sa productivité diminuer de 50% sur le XX^e siècle au-dessus de 800 m d'altitude (Cf. Fig. 3). VENNETIER *et al.* (2007) ont également observé sur le versant nord, lors de l'épisode climatique 2003-2007, des pertes de croissance en diamètre de l'ordre de 30 à 40%, un déficit d'aiguilles de 30 à 60% et un taux de mortalité moyen de 10% à 30% des individus adultes, touchant surtout les vieux arbres, et de 70% sur la régénération (semis de moins de 10 ans). Les peuplements jeunes (30-70 ans) ont été relativement moins touchés. Certains des peuplements de basse altitude (300-500m), ont été localement presque entièrement décimés (90%), alors que leur croissance avait plutôt bien résisté ou parfois augmenté au XX^e siècle. La projection d'un scénarios même relativement optimiste de changements climatiques au XXI^e siècle (2,5°C) dans le modèle de relations climat/croissance pour ces pins sylvestres, d'une part, et dans un modèle de bilan hydrique global pour la forêt provençale montre : (1) un effondrement rapide de la croissance du pin sylvestre, qui perd plus de 70% avant la fin du siècle, et (2) la disparition finalement complète de l'aire du pin sylvestre, donc de celle du hêtre plus exigeant encore, dans l'ensemble des massifs montagneux locaux (Sainte-Baume, Etoile, Sainte Victoire, et même de tout le versant sud du Luberon). La zone favorable au chêne blanc se réduit aussi comme peau de chagrin.

Les travaux les plus récents ne font malheureusement que confirmer les tendances amorcées précédemment: un nouvel inventaire en 2019 d'une partie d'un réseau de placettes permanentes d'INRAE en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (VENNETIER 2020), et l'étude approfondie du pin sylvestre sur toute cette région (MARTY *et al.* 2018) constatent tous deux une dégradation généralisée de l'état sanitaire des principales espèces forestières de la forêt méditerranéenne française : chêne vert et chêne pubescent, pin d'Alep et pin sylvestre (Cf. Fig. 4). Les taux moyens de défoliation entre 2016 et

2019 étaient très élevés, atteignant ou dépassant 50%, à l'exception du pin d'Alep normalement bien plus résistant à la chaleur et sécheresse, mais qui était malgré tout très touché (40%). Les mortalités de cimes et de branches étaient également très importantes, notamment chez le chêne pubescent. Il n'y avait quasiment pas d'arbre dans ces inventaires que l'on puisse considérer comme

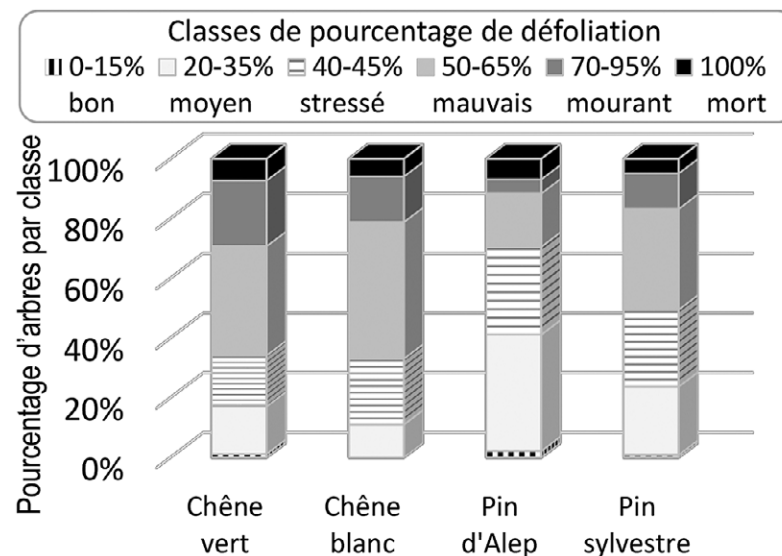
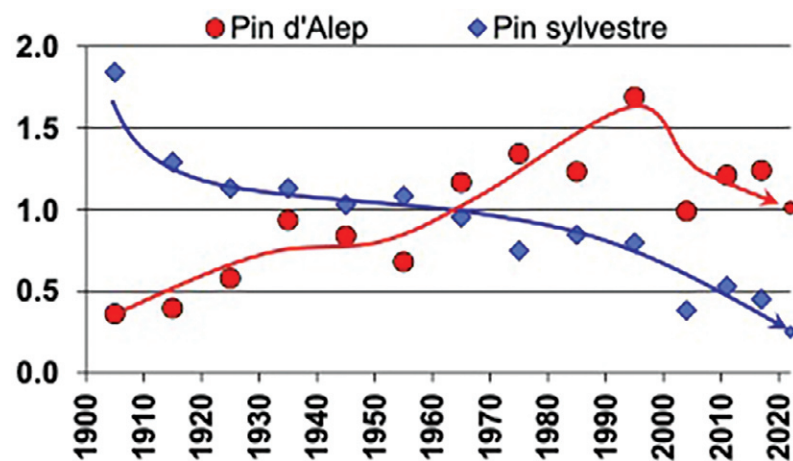


Fig. 3 (en haut) : Evolution de la productivité relative du pin d'Alep et du pin sylvestre dans le massif de la Sainte-Baume et ses environs depuis 1900. Les valeurs sont centrées par espèce sur leur moyenne de 1960. En pratique, la production du pin sylvestre est 2,5 fois inférieure à celle du pin d'Alep dans le massif. Les valeurs de la période 2017-2022 (marques plus petites) sont extrapolées à partir des modèles de relation climat-croissance établis pour le XX^e siècle (1900-2006).

Fig. 4 (ci-dessus) : Etat sanitaire des quatre espèces principales de la forêt méditerranéenne française en 2016-2019, évalué par leur pourcentage d'individus par classe de défoliation. Pour le chêne pubescent, les mesures ayant été réalisées en hiver, le taux de défoliation est extrapolé à partir d'une notation du déficit de développement architectural du houppier, calibré avec la défoliation sur des arbres tests en saison de végétation.

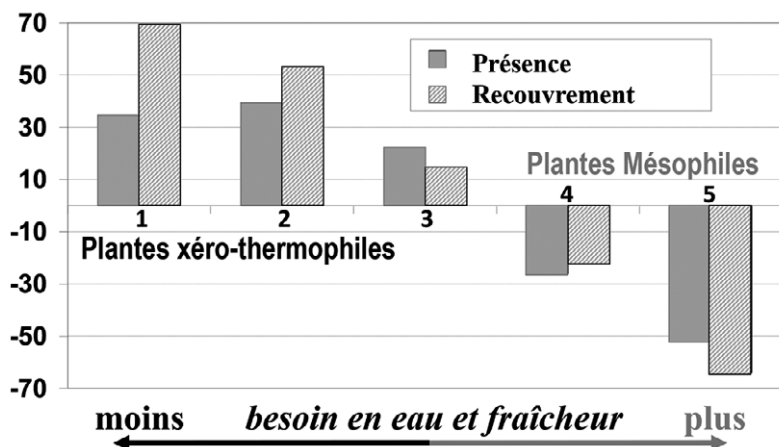
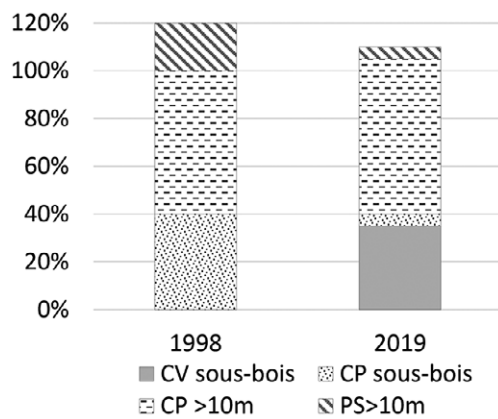


Fig. 5 (ci-dessus) : Evolution de la flore sur 10 ans dans le réseau de placettes permanentes d'INRAE en Provence, entre 1998 et 2008. Les plantes les plus mésophiles ont fortement perdu en présence (nombre de placettes où on les trouve) et encore plus en recouvrement (somme des coefficients de Braun Blanquet), c'est-à-dire aussi en nombre ou taille d'individus par placette de présence. Dans le gradient de l'axe horizontal, le hêtre et le pin sylvestre sont dans la classe 5, le chêne pubescent dans la classe 4, le chêne vert dans la classe 2, le pin d'Alep dans la classe 1.

bien portant et 60% des arbres (pin d'Alep) à 90% (chêne pubescent) avaient un déficit supérieur ou égal à 40%. Le nombre d'arbres mourants et morts était particulièrement élevé chez les chênes, et de façon surprenante chez le chêne vert, supposé résistant à la sécheresse. La croissance du pin sylvestre, après un rebond temporaire entre 2010 et 2014, avait fortement replongé depuis 2015 (Cf. Fig. 3), en particulier chez les arbres de plus de 70 ans, et ceux attaqués par le gui. Cette tendance de la défoliation est conforme à celle constatée à plus large échelle par le Département Santé des forêts (DSF) sur son réseau de suivi régional. Les trois années à la fois chaudes et sèches qui ont suivi (2020 à 2022) n'ont pu qu'aggraver l'état sanitaire de ces quatre espèces.

En plus des conséquences des canicules et sécheresses, on constate une multiplication des dégâts de gel (ça peut sembler paradoxal), de parasites et de maladie. Ils s'expliquent par le dérèglement de la phénologie des végétaux, animaux et parasites des plantes, qui modifie leurs cycles de vie et de reproduction et leurs périodes d'activité (cf. p. 101).



Tous ces chiffres sont cohérents avec l'état actuel de la forêt relique de la Sainte-Baume, et de ses deux espèces dominantes, hêtre et chêne pubescent. On peut donc s'interroger son avenir, dans le contexte actuel de dérèglement climatique accéléré. D'autant que l'étude de l'évolution de la flore dans l'ensemble de la Provence (Cf. Fig. 5) montre que les espèces mésophiles (nécessitant le plus de fraîcheur et d'humidité, dont fait partie le hêtre) et les forêts où elles sont bien représentées (dont fait partie la Sainte-Baume) sont globalement et de loin les plus touchées par le dérèglement climatique récent (VENNETIER et RIPERT 2010). D'après cette étude, bien que la flore possède une certaine résistance et résilience aux stress temporaires, le maintien du climat actuel sur le moyen terme conduirait à une modification de 25% de la composition floristique par rapport aux années 1990 : les dépérissements de forêts ne touchent donc pas que les arbres, mais l'ensemble de la flore, ce qui interroge sur l'avenir des nombreuses espèces qui font l'originalité de la forêt sacrée de Sainte-Baume.

Comme preuve locale des évolutions en cours, le pin d'Alep a gagné en 50 ans entre 100 et 150 m en altitude sur les pentes du massif de la Sainte-Baume, en versant nord comme en versant sud. Sur ce dernier, il dépasse maintenant 900 m. Et au cours de l'inventaire des placettes permanentes INRAE en 2019, une invasion très rapide par du chêne vert a été mesurée dans la zone de plan d'Aups à 700 m d'altitude au pied du versant nord : désormais, il domine largement le sous-bois, entre 50 cm et 3 m de haut, dans des futaies adultes mélangées de pin sylvestre et chêne pubescent dont il était totalement absent en 1998 (Cf. Fig. 6). Dans le même temps, le pin sylvestre a largement dépéri dans l'étage dominant et le chêne blanc quasiment disparu du sous-étage.

Fig. 6 (ci-contre) :

Evolution en 20 ans du couvert cumulé des ligneux dans un peuplement mixte pin sylvestre (PS) - chêne pubescent (CP) sur le plateau de Plan d'Aups-Sainte-Baume. Le pin sylvestre a presque disparu de la canopée (>10m), remplacé seulement partiellement par le chêne pubescent touché à son tour par des dépérissements et mortalités. Ce dernier a quasiment disparu du sous-étage et surtout de la régénération, presque intégralement remplacé par le chêne vert (CV), qui était totalement absent en 1998.

L'adaptation (ou inadaptation !) des plantes aux stress climatiques

Fonctionnellement, les plantes adaptent leur développement (hauteur, rapport racines/surface foliaire, profondeur d'enracinement, largeurs de cernes...), leur anatomie (taille et structure des vaisseaux conducteurs de sève, épaisseur des cuticules des feuilles, etc.) et leur stratégie de résistance-résilience aux stress (fermeture plus ou moins rapide et prolongée des stomates avec le stress hydrique, constitution et utilisation de réserves, réparations des tissus lésés...) au climat moyen de leur aire de répartition et plus précisément, au sein de cette aire, à celui de leur zone de croissance. Elles cherchent l'équilibre (HUC 2011) entre :

- un maintien de leur capacité photosynthétique au début des périodes de stress hydrique, pour soutenir leur croissance et leur capacité de reproduction (il faut être concurrentiel dans la compétition avec leurs voisines !). Cette stratégie implique une forte résistance des vaisseaux conducteurs de sève, car pomper de l'eau devenue rare implique une forte dépression. Elle s'appelle anisohydrie, et le chêne vert en est un exemple. Elle est risquée si un fort stress hydrique se prolonge, car la plante épuise rapidement les réserves en eau du sol et peut finir par mourir « de soif » ;

- une stratégie d'évitement des stress hydriques, dite isohydrie. Elle implique dès le début des périodes de déficit l'arrêt d'alimentation en eau par fermeture des stomates, donc des sacrifices de photosynthèse et de croissance pour préserver la ressource. Le pin d'Alep en est localement la tête de file. Elle a l'inconvénient de limiter la croissance et de réduire les réserves de la plante qui peut, en cas de stress très prolongé, mourir « de faim » ou d'attaques de parasites faute d'énergie pour se défendre.

Les études récentes à l'échelle mondiale (JIN *et al.* 2023) montrent que, logiquement, les plantes des zones plus arides, où la végétation est moins dense et haute, adoptent majoritairement une stratégie « conservatoire » (isohydrie), privilégiant la sécurité à court terme par rapport à la croissance. À l'inverse, les plantes de milieux plus humides où la compétition aérienne est plus forte privilégient une optimisation de la croissance au détriment de la sécurité (anisohydrie). Il existe bien sûr des plantes ayant des stratégies intermédiaires.

Le problème actuel des plantes mésophiles en climat méditerranéen, comme dans beaucoup d'autres climats, c'est que les stress hydriques et thermiques, et encore plus leur combinaison, dépassent de loin les valeurs habituelles pour lesquels elles ont été patiemment sélectionnées : que ce soit génétiquement par des millénaires d'évolution (potentiel de l'espèce), ou anatomiquement au cours de leur existence individuelle (développement adaptatif dans la gamme d'amplitude permise par leur génétique). Elles sont donc particulièrement vulnérables car inadaptées à ces stress, particulièrement les vieux arbres dont le développement (dimensions, anatomie) s'est fait jadis dans un climat différent. Mais l'accroissement des stress étant également important et trop rapide dans les zones chaudes ou arides, la flore est finalement en danger partout. Lors de l'étude d'une série de plantes méditerranéennes majoritairement xérophiiles le long d'un fort gradient d'aridité, ALON *et al.* 2023 ont montré que pour une espèce donnée, il y avait une relativement faible variation des limites physiologiques vitales le long de ce gradient. Et donc que si ces plantes pouvaient s'adapter au changement climatique actuel lorsqu'elles étaient loin des limites sèches et chaudes de leur aire, leur dépérissement était probable à proximité de ces limites, même pour celles qui semblent les plus résistantes.

Cela explique les dégâts observés dans tous les écosystèmes de la planète, en zones humides comme en zones arides. En témoignent localement les dépérissements observés sur des espèces supposées très résistantes à la sécheresse dans les garrigues côtières de nos régions (CAILLERET *et al.* 2020), et qui n'épargnent pas le bas du versant nord et tout le versant sud du massif de la Sainte-Baume. Indépendamment du bilan hydrique, ou en combinaison avec lui, on atteint parfois lors des canicules récentes (46°C à Vérargues dans l'Hérault en 2019) la limite de tolérance thermique des plantes, qui alors meurent « de chaud » ! La fréquence et l'intensité de ces canicules ne peut qu'augmenter.

La reproduction des plantes est compromise

La reproduction du hêtre n'a pas été étudiée précisément dans la Sainte-Baume. Et les travaux sur la relation entre production

de faines (le fruit du hêtre) et sécheresse sont rares, son aire de distribution y étant jusqu'à récemment peu soumise. Dans cette aire, le hêtre alterne naturellement des années de forte fructification, espacées irrégulièrement de 2 à 11 ans, avec des années de reproduction faible ou nulle. Cette tendance des espèces à une fructification massive irrégulière est une stratégie de survie, développée par celles (par exemple certains chênes et le hêtre) dont les fruits charnus font l'objet d'une forte prédation par la faune. En quantité moyenne et régulière chaque année, les fruits seraient presque tous consommés et entretiendraient de fortes populations de prédateurs et parasites. Au contraire, les chances de survie des fruits augmentent si leur quantité occasionnelle dépasse la capacité de destruction des populations de prédateurs, limitées par les années de faibles ressources. Si le hêtre ne fructifie jamais abondamment deux années successives, c'est aussi parce que cette production massive de faines épuise ses réserves, qu'il doit ensuite reconstituer. Les cernes de croissance du tronc, plus étroits que la normale ces années-là, témoignent de l'importance de cet effort reproductif.

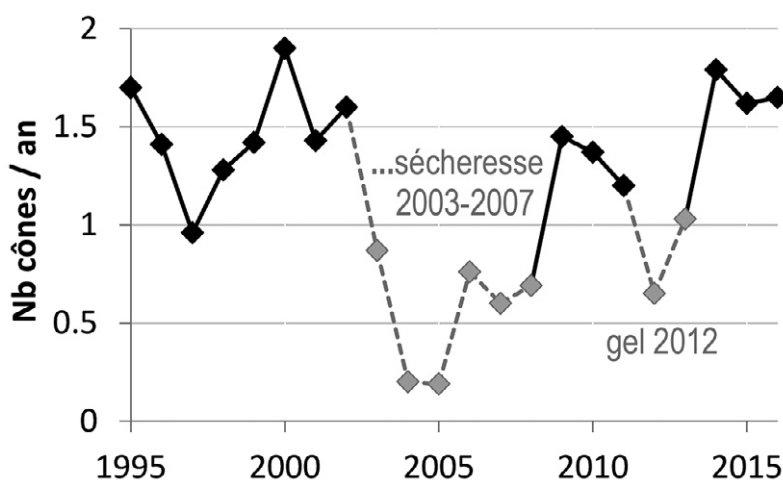
Dans la majeure partie de son aire, le déclenchement d'une floraison massive du hêtre dépend aussi des deux étés précédents : suivant les zones, ils doivent être soit tous les deux frais et humides (dans le sud et centre de son aire, ces conditions d'été étant rarement remplies en Provence), soit le premier frais et le second plus chaud (zones plus froides ou nordiques). Mais le succès dépend aussi, dans toute son aire, d'un printemps ou début d'été suffisamment chauds et secs, l'année de floraison, pour favoriser la dissémination du pollen par le vent. La floraison

même intense peut aussi échouer en cas de gel tardif, auquel le hêtre est très sensible. De plus, le développement des fruits peut être compromis, et le risque est élevé surtout en région méditerranéenne, en cas de forte sécheresse de printemps ou d'été : NUSSBAUMER *et al.* (2020) ont ainsi constaté une chute massive de faines avortées lors d'un épisode combiné sécheresse-canicule dans l'été 2018 en Suisse, suivant une bonne floraison.

DUGELAY (1958) rapporte que les fainées à la Sainte-Baume sont irrégulièrement espacées dans le temps, sans plus de précision, bien que suffisantes pour assurer à long terme la régénération du hêtre. Dans le massif de la Sainte-Baume, l'état de santé dégradé des hêtres, l'évolution actuelle du climat avec des sécheresses répétées et très peu d'années humide, et des hivers chauds favorisant un débourrement précoce donc des dégâts de gel tardif, ne peuvent que rendre plus rare et compromettre cette fructification.

Pour les autres arbres dominants de ce massif, des données plus précises existent. Entre la fin du XX^e siècle et les années sèches 2003-2006, THABEET (2008) y a mesuré sur le pin sylvestre une diminution de 75% du nombre de cônes par branche. Pour le pin d'Alep, la perte est de l'ordre de 60% en moyenne sur les 5 années de sécheresse successives de 2003 à 2007, et 85% en 2005-2006 (Cf. Fig. 7). Les études de germination ont aussi montré qu'après ces fortes sécheresses, les cônes de 2017 étaient plus petits, contenaient moins de graines, et que ces graines plus légères avaient une germination beaucoup plus lente, donnant naissance tardivement à des semis peu vigoureux. Ce retard de développement et cette vigueur réduite mettent les semis, beaucoup trop frêles et peu lignifiés en fin d'automne, à la merci d'un gel l'hiver suivant et d'une éventuelle sécheresse de printemps. La répétition dramatique des sécheresses de 2015 à 2022 en Provence ne peut qu'avoir réduit drastiquement sur le long terme les graines viables conservées dans des cônes sérotineux, et donc compromis la régénération après un éventuel incendie. Les dégâts de gel tardif en fin d'hiver 2012 ont aussi réduit de 45% le nombre de cônes par rapport à la normale, avec des conséquences encore significative (-33%) en 2013 (Cf. Fig. 7). De tels dégâts de gels avaient déjà été observés après un gel tardif en 1999, qui avait conduit à une quasi-absence de pluies de graines

Fig. 7 :
Nombre de cônes par an sur les axes principaux et secondaires forts des branches de pin d'Alep dans le massif de la Sainte-Baume et ses environs.



après incendie en 2001 dans toute la Provence.

Pour le chêne vert, les suivis sur le dispositif expérimental voisin de Font-Blanche (à Roquefort-la-Bédoule) ont montré un fort taux d'avortement des glands (25 à 70%) lors des épisodes de sécheresse et dans la zone d'exclusion de -30% des pluies, ceux qui restaient étant anormalement petits. Comme pour le pin d'Alep, cette taille réduite des fruits donne lieu à des semis de faible vigueur, peu aptes à survivre en cas de printemps ou été sec.

Il n'y a pas eu de mesure systématique de fructification sur le chêne pubescent sur le massif de la Sainte-Baume ni ses environs. Mais les observations régulières, lors de récoltes de glands pour d'autres expérimentations entre 2007 et 2015, et en milieu naturel depuis 2016 lors de l'étude du pin sylvestre et des inventaires de placettes permanentes, aboutissent aux mêmes conclusions que pour le chêne vert. L'état très dégradé des cimes leur interdit pour la plupart une fructification massive, par manque de branches vivantes et vigoureuses, et sans doute manque de réserves carbonées. En 2022, les glands étaient particulièrement petits, dépassant à peine des cupules par endroits après la grande sécheresse qui a marqué toute l'année.

On peut enfin noter que les sécheresses répétées réduisent fortement les populations de pollinisateurs, donc la fructification de très nombreuses plantes à fleurs déjà très affaiblies, et en conséquence à court ou moyen terme leurs populations, donc leur floraison. La réduction des floraisons mellifères et celle des pollinisateurs s'amplifient mutuellement dans un cercle vicieux.

Dérèglement des cycles de vie des végétaux et animaux (phénologie)

Le changement climatique conduit quasiment tous les végétaux pérennes à retarder leur mise au repos pour l'hiver, en raison des températures encore élevées jusqu'en fin d'automne. Il a avancé aussi, de parfois plusieurs semaines sur 50 ans, leur développement au printemps. Les pin d'Alep, pin maritime et pin pignon, n'arrêtent même quasiment plus leur croissance en hiver, les pousses d'une année commençant à se déve-



Photo 1 :

Le 12 décembre 2011, croissance déjà très avancées de futures pousses 2012 de pin pignon, avec ouverture des écailles protégeant les futures aiguilles. Ces pousses ont été tuées ou endommagées par le gel de février 2012.



Photo 2 :

Développement trop précoce des fleurs mâles du pin d'Alep (éclatement des enveloppes de bourgeons fin janvier 2012). Ces fleurs et les pousses qui les portent, en pleine croissance et gorgées de sève, ont été largement détruites par le gel (jusqu'à -12°C à basse altitude) et la neige durant toute la première quinzaine de février 2012 (on note la neige en arrière-plan).



Photos 3 :

Floraisons hors saison du chêne kermès sur la côte bleue à l'ouest de Marseille (décembre 2016), après une défoliation massive d'été suivie d'une repousse d'automne. Ces fleurs n'ont donné aucun fruit.

Photos M. Venetier.

opper dès l'automne de l'année précédente (VENNETIER *et al.* 2011, Cf. photo 1).

Ces pins polycycliques font même régulièrement une pousse supplémentaire au cours de l'année, permise par leur débourrement très précoce si la sécheresse ne les bride pas trop. Les fleurs mâles, qui devraient apparaître au mois de février, se développent sur ces pousses actives dès le mois de décembre, et peuvent être déjà à un stade de développement avancé (éclatement de leur enveloppe) entre fin janvier et début février lors de potentiels épisodes de gel (Cf. photo 2).

On observe même depuis 2010 des cas de floraison dès décembre de végétaux qui devraient fleurir en fin d'hiver ou au printemps (chênes kermès, genévriers, cistes, romarins), notamment après des étés très secs qui ont déstabilisé leur cycle de vie (Cf. photo 3). Ces floraisons décalées ne donnent aucune fructification, les fleurs ou jeunes fruits étant détruits en cours d'hiver. Elles perdent aussi une grande partie de leur intérêt pour les pollinisateurs.

Ces dérèglements des périodes de croissance rendent donc toute la flore très vulnérable à des gelées précoces ou tardives, se produisant alors que les tissus et les troncs sont gorgés de sève. Le hêtre y est particulièrement sensible, ces gels ayant été l'une des principales causes de ses dépérissements occasionnels au XX^e siècle dans la moitié nord de la France. Pour toutes les espèces, lorsque les tissus des rameaux ne sont pas tués directement par le gel mais seulement lésés superficiellement, les attaques de champignons pathogènes prennent le relais et peuvent détruire un fort pourcentage des pousses des dernières années, encore non lignifiées. Sur le site expérimental de Font-Blanche, mesurés depuis 2007, ces dégâts ont touché plus de 30% des branches suivies.

Lors de l'étude réalisée sur des dizaines de pinèdes choisies au hasard dans les Bouches-du-Rhône et l'ouest du Var au printemps 2012, après le gel tardif particulièrement destructeur (Cf. photo 2), 95 % des pins d'Alep présentaient des rameaux tués très récemment, avec des aiguilles d'un à deux ans roussies mais encore attachées (clairement effet du gel ou des maladies) : 51% moyennement touchés (10 à 19% de pertes de rameaux de 1 à 2 ans), 12% fortement (20 à 39% de pertes), 8% considérés comme dépérissants ($\geq 40\%$ de rameaux tués) et 1% morts ou mourants. En parallèle de gros dégâts avaient été notés sur la flore des sous-bois et garrigues, conduisant à des mortalités de feuilles et rameaux et une floraison printanière très faible. Ils faisaient écho à ceux notés cette année-là sur la vigne, les oliviers et autres arbres fruitiers en Provence, et dans toute la France sur diverses cultures.

Paradoxalement, le réchauffement hivernal augmente donc directement les dégâts de gel, et indirectement ceux des maladies. De plus, indépendamment du gel, des travaux récents montrent que le dérèglement de la phénologie joue directement sur la santé des écosystèmes des zones tempérées et froides (Li *et al.* 2023) : un démarrage très précoce

de la végétation au printemps l'année d'une sécheresse sévère en été diminue nettement leur résilience, de même qu'un démarrage retardé au printemps suivant, qui peut être le fruit des variations climatiques ou simplement de l'épuisement de l'écosystème.

Il existe de nombreux autres effets néfastes des décalages phénologiques de la flore mais aussi de la faune : certains pollinisateurs voient leur cycle décalé différemment de celui des fleurs qu'ils butinent, certains prédateurs ne trouvent plus leurs proies habituelles au moment où elles en ont le plus besoin, certains parasites émergent trop tôt ou trop tard par rapport à leur hôte, etc. Un des effets le plus dommageables pour les arbres est la multiplication sur une année des cycles de reproduction de certains de leur parasites (notamment les scolytes qui attaquent leurs troncs ou leurs branches, les champignons pathogènes des feuilles et rameaux, les insectes qui mangent leurs racines...), et qui conduit à l'augmentation exponentielle de leurs populations. Les attaques massives et répétées par ces parasites dépassent les limites de résistance des arbres, notamment s'ils sont déjà affaiblis par les canicules ou sécheresses. La virulence et la multiplication des champignons pathogènes augmente aussi en raison des températures plus élevées lors des mois humides de printemps et d'automne, dont la relative fraîcheur limitait leur développement dans le passé.

Effets sur le fonctionnement et la fertilité du sol

Dans les écosystèmes forestiers, 99% au moins de la biodiversité, en nombre d'espèces et d'individus par espèce, se situe dans le sol. C'est cette biodiversité, son équilibre et son activité, qui conditionnent la fertilité et le bon fonctionnement des sols (VENNETIER 2022). Or le changement climatique actuel a des effets très délétères sur ses multiples composantes. Bactéries, champignons, algues, faune et microfaune, souffrent en effet de l'accroissement des sécheresses et canicules, que ce soit en intensité, durée ou fréquence : elles ralentissent fortement l'intensité et la durée de leurs périodes d'activité, limite leur croissance et leur reproduction. Certains maillons essentiels des chaînes alimentaires et des cycles des élé-

ments nutritifs disparaissent. La structure du sol et sa porosité, qui ensemble déterminent sa résistance à l'érosion, son aération, sa perméabilité et sa capacité de stockage de l'eau, sont toutes deux très dépendantes de l'activité biologique, et sont donc dégradées.

Pour la hêtraie, DAHL *et al.* (2023) ont réalisé une expérience de manipulation de la température du sol et d'exclusion de la neige en hiver, reproduisant le futur changement climatique. Ils montrent que des groupes essentiels du microbiome du sol, notamment les bactéries responsables du cycle de l'azote et les champignons décomposeurs du bois, sont largement affectés et dérivent rapidement vers ceux de peuplements situés des centaines de kilomètres plus au sud. Ils notent aussi que, plus que les variations de température moyenne, ce sont les coups de gels qui se produisent au cœur d'un hiver chaud, sur des populations actives, qui font le maximum de dégâts, comme on l'a constaté par ailleurs sur la végétation elle-même. Ces coups de froids en hiver chaud sont donc bien un des risques majeurs de l'écosystème « hêtraie » de la Sainte-Baume, et pas seulement pour les végétaux.

En forêt méditerranéenne plus généralement, PAILLER (2013) a montré que la structure et la composition des communautés microbiologiques du sol dépendaient fortement d'interactions entre la composition floristique de la forêt qui joue un rôle clef (pas seulement les arbres dominants), les conditions de sol (importantes) et le climat, ce dernier ayant un rôle plus secondaire. Ces interactions expliquaient aussi la réaction de ces communautés à des épisodes répétés de sécheresse et de canicule. La dérive floristique observées récemment (avec comme exemple la disparition progressive du hêtre et de son cortège végétal mésophile dans la Sainte-Baume) pourrait donc jouer un rôle important et direct, en plus du changement climatique lui-même, dans l'évolution de ces communautés du sol. Et les transformations du sol liées aux modifications et à la perte d'activité de sa biodiversité devraient renforcer ces effets négatifs dans un cercle vicieux.

Risque d'incendie

Sécheresses et canicules répétées jouent sur le risque d'incendie par plusieurs mécanismes : (1) d'une part directement, à court terme, la baisse toujours plus forte de la

teneur en eau de la végétation vivante, de la litière et du sol lors de ces épisodes, qui les rend plus inflammables et plus combustibles ; (2) d'autre part, à moyen terme, l'accumulation progressive de biomasse morte et donc très combustible, liée aux dépérissements qui se multiplient dans tous les étages de végétation ; (3) enfin, à plus long terme, l'ouverture de la canopée des peuplements jadis denses et fermés, entraînant un microclimat moins frais et le développement du sous-étage. Cela crée une plus forte continuité verticale et horizontale du combustible.

Les forêts deviennent donc globalement plus vulnérables aux incendies. Ces risques croissants se traduisent déjà, dans la plupart des régions du monde, par une multiplication des incendies, de leur fréquence localement, de leur extension géographique à des zones jadis non ou peu concernées, et de leur intensité. On note en particulier l'occurrence croissante de méga-feux, échappant à toute possibilité de contrôle du fait de leur ampleur et de leur intensité extrême. Cette tendance est pour l'instant contenue en France grâce à une politique très active de prévention et lutte, même si l'intensité et la vitesse de progression des feux a considérablement augmenté ces dernières décennies. Mais les modèles de feu développés récemment (BARBERO *et al.* 2019), basés sur les caractéristiques du climat et sur l'état de la végétation, confirment pour la France à la fois : (1) des incendies plus nombreux dans les zones jusque-là peu combustibles (par ex. zones alpines), en lien avec la durée plus longue des sécheresses, et (2) en régions méditerranéennes, deux à trois fois plus de feux de grande ampleur, liés à la conjonction de conditions climatiques extrêmes sur des périodes courtes et au dessèchement de longue durée du sol et donc de la végétation. Les feux de 2022 dans le sud-ouest de la France ont validé ces tendances.

GANTEAUME *et al.* (2021) étendent ces prédictions à tout le sud de l'Europe, dans le contexte des interfaces entre milieux naturels et zones urbanisées, qui concentrent à la fois les dépôts de feu et les enjeux de défense des installations et vies humaines. Ils notent que c'est une échelle très large des paysages régionaux qu'il est nécessaire d'organiser la prévention et la lutte, en incluant tous les acteurs, en raison des risques désormais avérés de méga-feux. La défense contre les incendies du massif de la Sainte-Baume doit ainsi impliquer toutes les collectivités et

agglomérations voisines du massif à l'échelle, au moins, du Parc naturel régional.

Il était jusqu'à récemment admis que les dommages liés aux incendies, dans les milieux typiquement méditerranéens, n'avaient pas de conséquences graves à long terme en raison de l'adaptation des écosystèmes à ce risque. Certains de ces écosystèmes dépendent même du feu pour leur régénération et le maintien de leur biodiversité. Mais le hêtre n'étant absolument pas résistant aux incendies même de faible intensité, en raison de son écorce très fine et de son aubier sensible à la chaleur, un incendie de la forêt relique lui serait fatal, contrairement au chêne pubescent capable de rejeter rapidement.

De plus, ce paradigme est remis en cause par l'augmentation simultanée des fréquences et intensités des stress climatiques (sécheresses, canicules) et des incendies. Ainsi dans le massif des Maures, la canicule et les sécheresses successives entre 2003 et 2007, combinées avec des incendies répétés (de 3 à 5 entre 1950 et 2003), ou avec un incendie en 2007 à la fin de cet épisode climatique exceptionnel, ont provoqué un effondrement de l'écosystème dans la plupart de ses composantes (VENNETIER *et al.* 2008) : quantité et qualité de la matière organique et teneur en certains éléments nutritifs (VERGNOUX *et al.* 2009), porosité et structure du sol, activités microbiologiques et biomasse microbienne (GUÉNON *et al.* 2013), populations de la faune et microfaune, structure et composition de la végétation. Les chênes-lièges n'ont pas rejeté massivement après le feu de 2007 (Cf. Photo 4), et ceux qui avaient rejeté après le feu de 2003 ont massivement dépéri à partir de 2006, faisant

passer de nombreux peuplements de l'état de suberaie dense à celui de maquis assez clair ponctué de chênes-lièges disséminés.

La répétition d'incendies trop rapprochés (plus d'un tous les 25 ans dans le cas des Maures) rend donc le milieu beaucoup plus sensible aux sécheresses, de même que la répétition des sécheresses (plus de trois ans successifs) rend le milieu beaucoup plus vulnérable au feu. Un exemple représentatif est celui des populations de vers de terre (Cf. Fig. 8), dont le rôle écologique est primordial dans ces milieux pour la structuration du sol, l'activité biologique et les cycles des éléments nutritifs et du carbone (CECILLON *et al.* 2009). Leurs populations qui restaient initialement abondantes après le feu de 2003 ont perdu de 40 à 85% en nombre d'individus et en nombre d'espèces présentes avec les sécheresses entre 2005 et 2007. La baisse était d'autant plus forte que les peuplements avaient subi des incendies plus nombreux dans les 50 dernières années et plus récents pour le dernier. Parallèlement l'activité de ces vers a encore plus diminué en raison de la réduction forte de la taille de ces vers, qui ne subsistaient que par des juvéniles, un fort pourcentage de la surface du sol ne présentant plus aucune trace d'activité récente (jusqu'à 50%). Derrière le feu de 2007, les vers de terre avaient quasiment disparu, avec 1 seul individu échantillonné en moyenne pour 10m², soit moins de 2% de la population d'origine.

Le suivi de ces populations dans les 5 années suivantes a montré que, dans les zones les plus touchées, elles ne se reconstituaient que très lentement, se disséminant principalement à partir de refuges épargnés par le feu, progressant spatialement de quelques mètres par an. La résilience des qualités physiques et chimiques du sol ne pouvait en être que fortement ralentie.

Les services écosystémiques menacés

La dégradation des forêts méditerranéennes, que ce soit par dépérissement ou incendie (et pire des deux combinés) affecte tous les services écosystémiques qu'elle procure, et en particulier ceux liés au carbone (VENNETIER 2000) et à l'eau (DUHEN 2022)

La fixation de carbone est un des points clefs qui peut justifier la gestion et la protec-

Photo 4 :

Contrairement à ce qui est habituellement observé, un an après un incendie de l'été 2007 dans les Maures, les chênes-lièges n'ont quasiment pas rejeté à partir des troncs et branches principales. Le sol est loin d'être couvert par les rejets du maquis ou par des herbacées. Ce feu survenant lors de la 5^e année successive de sécheresse, va transformer la suberaie en maquis clair au sol très dégradé.

Photo M.V.

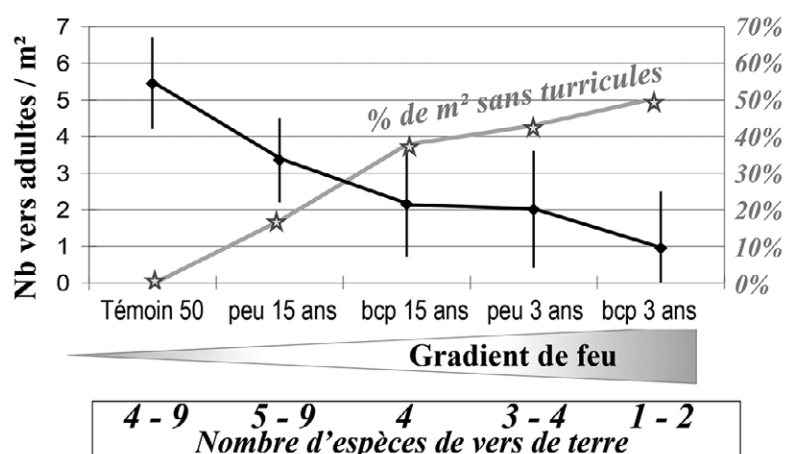


tion de forêts même peu productives dans le contexte actuel, et faire l'objet de transactions financières. Cette fixation (puits de carbone) décroît mécaniquement avec la forte baisse de productivité des forêts, et encore plus avec les dépérissements, qui tendent à remettre rapidement en circulation le carbone supposé stocké pour longtemps dans le bois. Les expérimentations de suivi des flux de carbone dans la région montrent même que ces forêts peuvent, à l'occasion des pics de sécheresse d'été, relâcher plus de gaz à effet de serre qu'elles n'en fixent, même en absence de dépérissement. Les incendies, directement par la combustion de la végétation et du carbone du sol, indirectement par l'érosion qui peut suivre, et le manque de résilience de l'écosystème à ces feux en cas de sécheresse répétée, contribuent aussi à de fortes émissions de CO₂. La dégradation des sols et de la végétation joue aussi sur la capacité des forêts à retenir l'eau, en termes de limitation du ruissellement, d'infiltration et de capacité de stockage : on oublie parfois que certains écosystèmes forestiers ont plus de stocks de carbone dans le sol que dans la biomasse aérienne ! Cette dégradation fonctionnelle touche la structure physique (porosité et agrégation à toutes les échelles) et la teneur en matière organique, qui contribuent au rôle d'éponge. Le risque de crues, et de dégâts liés aux coulées de boues et retombées de cendres dans les versants après incendies et dans les réservoirs d'eau, sont d'autant plus exacerbés que les pluies extrêmes sont en augmentation, tant en fréquence qu'en intensité moyenne.

Bien d'autres fonctions sont bien sûr dégradées : les paysages, les fonctions de productions de bois (bois d'œuvre, d'industrie et d'énergie) comme de produits non ligneux (champignons, fruits, etc.), les capacités d'accueil (interdictions d'accès en périodes de risques, ombrage limité), le pouvoir de tempérer l'atmosphère en période chaude, etc.

Comment adapter la gestion des forêts

Devant le constat très alarmant de l'évolution des risques pour la forêt avec le changement climatique, et les transformations déjà largement à l'œuvre, les forestiers doivent sans attendre adapter les modes de gestion. Des solutions existent, elles ont été déjà testées largement, mais il reste à les faire pas-



ser dans la pratique même si elles remettent en question des habitudes et certitudes héritées du passé.

Il est bien sûr nécessaire de conserver hors gestion des forêts en libre évolution, des réserves intégrales, et autres modes de protection : ils permettent d'étudier le comportement naturel des écosystèmes, de tirer parti de leurs capacités d'adaptation et de résilience spontanées et de vérifier leur efficacité, d'observer les espèces qui tirent le mieux leur épingle du jeu, et qui pourraient être privilégiées ailleurs. Mais dans une grande partie des forêts anthropisées, et gérées pour des fonctions de production ou de protection, trop attendre expose à la disparition pure et simple du couvert arboré et à la perte de ces fonctions pour une longue durée. Les expérimentations et études scientifiques réalisées dans le monde entier depuis quelques décennies montrent que quatre actions principales, dont les résultats concordants font consensus, peuvent être entreprises.

1 – Éclaircir

Quasiment tous les essais réalisés (plus de 200 dans le monde) concluent qu'éclaircir un peuplement dense, ou réduire son sous-étage, le rend plus résistant et plus résilient aux sécheresses. Il est logique qu'en présence d'un déficit d'eau, la compétition entre végétaux pour cette ressource devienne féroce. La réduction de la surface foliaire réduit la consommation d'eau et donc cette compétition qui affaiblit l'ensemble de la végétation. L'intensité optimale de cette réduction dépend bien sûr de l'importance relative du manque d'eau, de l'espèce concernée ou des espèces en mélange et de leurs stratégies

Fig. 8 : Diminution des populations de vers de terre (échelle de gauche), du nombre d'espèces (en bas) et de leur activité (échelle de droite) après 4 années de sécheresse dans le massif des Maures, en fonction du régime de feu passé sur 50 ans et du temps écoulé (3 ou 15 ans) depuis le dernier feu : témoin (pas de feu), peu (1 ou 2 feux), beaucoup (bcp: 3 à 5 feux). Ligne noire et losanges = Nombre de vers adultes/m². Ligne grise et étoiles, pourcentage de surface sans activité récente de vers (notés sur des quadrats de 1m²).

d'adaptation, de leur âge, de leur résistance naturelle à ce stress, de leur complémentarité et niveau de compétition interspécifique, de l'histoire et de la structure du peuplement, etc. Il n'y a pas de formule miracle et unique pour optimiser l'éclaircie, à adapter à chaque situation. Des essais ont montré par exemple que dans des peuplements de pin sylvestre en danger, on obtenait un résultat favorable et identique en éclaircissant la canopée ou en réduisant fortement le sous-étage et les strates herbacées avec du sylvo-pastoralisme. Dans des peuplements mélangés, certaines espèces profitent parfois plus de l'éclaircie que les autres. En région méditerranéenne, l'ouverture des peuplements se traduit le plus souvent par un fort développement des strates basses, qui en limitent ou même annulent les effets positifs car elles sont gourmandes en eau, tout en augmentant le risque d'incendie. Une gestion intégrée est donc nécessaire.

2 - Rajeunir

Là encore les analyses scientifiques ne laissent aucun doute : les vieux arbres sont plus impactés, moins résistants et moins résilients que les jeunes aux canicules et sécheresses. La mortalité des plus vieux hêtres notée depuis plus d'un siècle dans la forêt sacrée, alors qu'ils sont loin de la limite d'espérance de vie de l'espèce, en est un exemple marquant. Outre ces dépérissements plus marqués et confirmés localement, leur productivité souffre d'avantage et plus longtemps des stress climatiques. Celle du pin sylvestre en zone méditerranéenne française est édifiant (Cf. Fig. 9). Depuis le début du réchauffement rapide des températures et la multiplication de sécheresses à partir

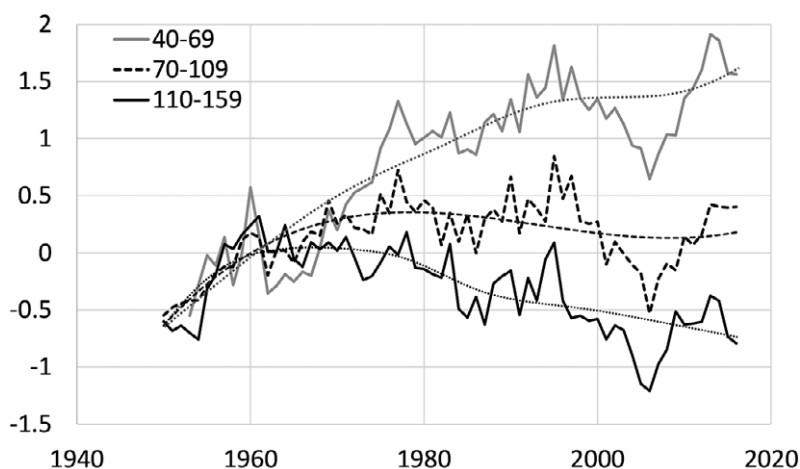
de 1960, les vieux arbres ont vu leur productivité décliner rapidement, celle des arbres d'âge moyen se stabilisant et ne déclinant que 30 ans plus tard, tandis que celle des jeunes continuait en moyenne à accélérer. Il pourrait paraître logique que la productivité des plus vieux arbres diminue avec le temps. Cependant, celle de la génération 110-159 ans était en nette augmentation ou stable quand elle avait l'âge de la génération actuelle 70-109 ans qui décline. De plus, les modèles de croissance du pin sylvestre dans la région, calculés sur tout le XX^e siècle, montrent une stabilité de la productivité entre 30 et 140 ans en absence d'accident majeur et de tendance climatique. Enfin, après la chute drastique de croissance identique pour toutes les classes d'âge, débutée au milieu des années 90 et atteignant son paroxysme avec la grande sécheresse 2003-2007, une claire différence de résilience apparaît : les jeunes retrouvent, sur la moyenne 2014-2016 le niveau du milieu des années 90, antérieur à l'accident (+7%), tandis que les arbres d'âge moyen et les vieux perdent respectivement 22% et 48% de leur productivité initiale.

Il serait donc utile de régénérer les vieux peuplements : (1) d'une part pour maintenir la productivité et la santé des forêts, donc leur fixation de carbone et autres fonctions vitales, (2) d'autre part pour limiter la biomasse morte et le risque d'incendie, (3) enfin pour permettre la sélection naturelle au sein des jeunes générations obtenues. Cette sélection doit porter sur les espèces, et au sein de ces espèces sur les individus, génétiquement et anatomiquement mieux adaptés aux conditions climatiques actuelles et future.

3 - Diversifier et substituer

Entre les événements climatiques extrêmes, les maladies et parasites qui gagnent en virulence ou en extension géographiques et les risques d'incendies qui s'aggravent, les peuplements monospécifiques purs et équiennes sont les plus menacés. Il est donc indispensable de diversifier au maximum les espèces de ces peuplements (PRÉVOSTO et RIPERT 2011), pour ne pas avoir « tous ses œufs dans le même panier », comme le veut la sagesse populaire. La littérature scientifique confirme que les mélanges d'espèces et les peuplements irréguliers d'âges variés sont moins attaqués par les parasites et maladies, et souvent plus résistants aux sécheresses. Le renouvelle-

Fig. 9 :
Evolution de la productivité du pin sylvestre entre 1950 et 2016 dans l'arrière-pays méditerranéen français en fonction de la classe d'âge. Les trois séries sont centrées sur l'année 1960 pour leur courbe de tendance.



ment de vieux peuplements peut être une bonne occasion d'accélérer la diversification : par exemple en conservant des semenciers d'espèces peu représentées, pour qu'elles se multiplient naturellement, par un travail de sélection lors des travaux d'entretien, ou par semis et plantation au sein de la régénération. Cela peut passer aussi par des introductions en sous-étage dans des peuplements conservés et éclaircis, par exemple des feuillus sous les pins. Ou par l'introduction de bouquets d'espèces d'avenir, disséminés à l'échelle du paysage, en comptant sur leur capacité naturelle de dispersion dans le futur. L'extension du cèdre à partir de parcelles forestières dans l'arrière-pays, ou dans la Sainte-Baume et bien d'autres lieux à partir des arbres d'ornements, est un exemple encourageant du potentiel de cette méthode sur le long terme avec un faible investissement.

Bien entendu, il sera parfois nécessaire de substituer entièrement des espèces prometteuses à une espèce menacée et sans avenir localement, notamment quand le dépérissement est très avancé.

Conclusion

La forêt méditerranéenne, en première ligne du changement climatique, souffre déjà fortement. Mais les dégâts deviennent importants dans quasiment tous les écosystèmes du monde. La forêt sacrée de la Sainte-Baume, et notamment sa hêtraie, est particulièrement menacée, car composée de nombreuses espèces en limite de leur aire, situées bioclimatiquement en position insulaire, donc sans solution de migration. Dans le massif de la Sainte-Baume plus largement, plusieurs des espèces principales, pin sylvestre et chêne pubescent, montrent des signes de dépérissement rapide. Les espèces les plus aptes à supporter le climat futur, comme le pin d'Alep et le chêne vert, ne sont pas épargnées, notamment les vieux peuplements, même si ces espèces conservent une marge d'adaptation. Les forestiers doivent anticiper les changements à venir. La survie d'une forêt productive et protectrice, fournissant les services écosystémiques qu'on en attend, passera largement par une gestion active qui éclaircira, rajeunira et diversifiera les peuplements.

M.V.

Bibliographie

- Allen, C. D., *et al.* 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4): 660-684.
- Alon A., Cohen S., Burlett R., Hochberg U., Lukyanov V., Rog I., Klein T., Cochard H., Delzon S., David-Schwartz R., *et al.*, 2023. Acclimation limits for embolism resistance and osmotic adjustment accompany the geographic dry edge of Mediterranean species. *Functional Ecology*: in press.
- Barbero, R., 2019. Simulating the effects of weather and climate on large wildfires in France. *Natural Hazards Earth System Science*, 19(2): 441-454.
- Bauby P., 1930. La forêt de la Sainte-Baume, *Revue des Eaux et Forêts* (REF), septembre 1930: 693-703
- Bonin, G., Sandoz, H., Thion, M., Vedrenne, G., 1983 a. Relations entre la dynamique de la végétation (chênaie-hêtraie) et les caractéristiques édaphiques dans le massif de la Sainte-Baume (Provence). *Ecologia Mediterranea* 9(3-4): 191-210.
- Bonin, G., Gamisans, J., Grüber, M., 1983 b. Etude des successions dynamiques de la végétation du Massif de la Sainte-Baume (Provence). *Ecologia Mediterranea*, 9(3-4): 129-171.
- Bonin, G. 2015. Dynamique de la végétation: connaissances et processus. *Forêt méditerranéenne* 36(4): 421-430.
- Cailleret, M., Audouard, M., Lopez, J.M., Estève, R., Martin-St-Paul, N., Vennetier, M., 2021. Peut-on gérer les romarins pour améliorer leur santé et floraison ? *Forêt méditerranéenne* 42(1): 3-12.
- Cecillon L., Cassagne N., Czarnes S., Gros R., Vennetier M., Brun J.-J., 2009. Predicting soil quality indices with near infrared analysis in a wildfire chronosequence. *Science of the Total Environment* Volume: 407(3): 1200-1205
- Dahl M. B., Kreyling J. Petters S. Wang, H. Mortensen M. S., Maccario L. Sørensen S.J., Urich T., Weigel R. - 2023. Warmer winters result in reshaping of the European beech forest soil microbiome (bacteria, archaea and fungi)—With potential implications for ecosystem functioning. *Environmental Microbiology*: in press.
- Dugelay A., 1958. La hêtraie de la Sainte-Baume. *Revue forestière française*, 1958(1): 1-26.
- Duhon, L. M., 2022. Les malheurs de la forêt font les malheurs de l'eau. *Forêt méditerranéenne* 43(4): 241-246.
- Ganteaume, A., *et al.* 2021. Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface. *Journal of Safety Science and Resilience* 2(1): 20-29.
- Gavinet J., Ourcival J.M., Lempereur M., Cabon A., Limousin J.M., 2018. Les taillis méditerranéens de chênes verts face aux changements climatiques : éclaircir pour améliorer leur résistance à la sécheresse. *Forêt méditerranéenne* 39 (3): 179-186.
- GREC PACA, 2016. Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Les cahiers du GREC-PACA, Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR), mai 2016, 44 pages. ISBN 9782956006015
- Guénon, R., *et al.* 2013. Trends in recovery of

Remerciements :

Les résultats présentés dans cet article sont le fruit de plus de 15 projets de recherche menés par l'auteur avec l'équipe Ecosystèmes méditerranéens et risques d'INRAE Aix-en-Provence durant 25 ans, associant de nombreux collègues et avec beaucoup d'équipes partenaires, appartenant à divers centres de recherche et universités de France et de divers pays. Ils impliquent plusieurs dizaines de personnes collègues, thésards, techniciens, contractuels et stagiaires qu'il est impossible de tous nommer ici.

Michel VENNETIER
INRAE, Aix-Marseille
Université, RECOVER,
équipe EMR
13100 Aix-en-Provence
michel.vennetier@inrae.fr

- mediterranean soil chemical properties and microbial activities after infrequent and frequent wildfires. *Land Degradation & Development* 24(2): 115-128.
- Huc, R., 2011. Les réponses des arbres aux contraintes climatiques : aspects écophysiologicals. *Forêt méditerranéenne* 32(2): 167-172.
- Jin, Y., Hao G., Hammond W.M., Yu K., Liu X., Ye Q., Zhou Z., Wang C., 2023. Aridity dependent sequence of water potentials for stomatal closure and hydraulic dysfunctions in woody plants. *Global Change Biology*: in press.
- Li, Y., Zhang, Schwalm, W., Gentine, C.R., Smith, W.K., Ciais, P., Kimball, J.S., Gazol, A., Kannenberg, S.A., Chen, A., Piao, S., Liu, H., Chen, D., Wu, X., 2023. Widespread spring phenology effects on drought recovery of Northern Hemisphere ecosystems. *Nature Climate Change* 13(2): 182-188.
- Marty, P., et al. 2018. Forêts méditerranéennes et alpines face aux changements climatiques : le cas du pin sylvestre en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Marseille, France, CNPF, Irstea, IDF: 83.
- Nussbaumer, A.; Meusburger, K.; Schmitt, M.; Waldner, P.; Gehrig, R.; Haeni, M.; Rigling, A.; Brunner, I.; Thimonier, A., 2020. Extreme summer heat and drought lead to early fruit abortion in European beech. *Scientific Reports*, 10: 5334 (11 pp.). doi: 10.1038/s41598-020-62073-0
- Pailler, A., 2013. Les relations sol/plantes en forêts méditerranéennes : Approche bioclimatique des déterminants de la structuration fonctionnelle des communautés microbiennes des sols et de leurs réponses à un double stress hydrique et thermique en région provençale calcaire. Thèse de doctorat, 235 p.
- Prévosto, B., Ripert C. 2011. Les forêts mélangées en région méditerranéenne : quels bénéfices et comment créer le mélange ? *Forêt méditerranéenne* 32(2): 187-191.
- Rathgeber, C., Guiot, J., Roche, P., Tessier, L., 1999. Augmentation de productivité du chêne pubescent en région méditerranéenne française. *Annales des Sciences Forestières* (56)3: 211-219.
- Ribes, A., Thao S., Vautard R., Dubuisson B., Somot, S., Colin J., Planton S., Soubeyroux, JM, 2019. Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics* 52(1): 1095-1114
- Thabeet, A. 2008. Réponse du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) aux changements climatiques récents en région méditerranéenne française: spatialisation et quantification par la télédétection et la dendrochronologie. IMEP - Cemagref Aix en Provence. Université Aix-Marseille 3, thèse: 261p.
- Vennetier, M. 2000. La forêt, puits de carbone. *Forêt méditerranéenne* 21(1): 31-32.
- Vennetier M., Vila B., Liang E.Y., Guibal F., Ripert C., Chandrioux O., 2007. Impact du changement climatique et de la canicule de 2003 sur la productivité et l'aire de répartition du pin sylvestre et du pin d'Alep en région méditerranéenne. *Rendez-Vous Techniques*, numéro spécial n°3 2007 Changements climatiques: 67-73
- Vennetier M., et al. (49 co-auteurs), 2008. Etude 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, Aix en Provence, 236 p.
- Vennetier M. et Ripert C., 2010. Flore méditerranéenne et changement climatique : la poursuite est engagée. *Forêt Méditerranéenne*, 31(1): 15-24
- Vennetier M., Girard F., Didier C., Ouarmim S., Ripert C., Esteve R., Martin W., Ndyaye A., Misson L. - 2011. Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique. *Forêt Méditerranéenne*, XXXII (2) 151-167.
- Vennetier, M., 2020. Forêts et changement climatique - Le constat en région méditerranéenne. *Science Eaux & Territoires* (33): 18-25.
- Vennetier M. - 2022. « L'essentiel est invisible pour les yeux » (Saint-Exupéry); Application à la biodiversité des sols forestiers. *Forêt Méditerranéenne*, 43(2) 123-130
- Vergnoux A., Dupuy N., Guiliano Michel, Vennetier M., Theraulaz F., Doumenq P. - 2009. Fire impact on forest soils evaluated using near-infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Talanta* 80: 39-47
- Vila B., Vennetier M., Ripert C., Chandrioux, O., Liang Er-Yuan, Guibal F., Torre F., 2008. Les changements globaux ont-ils déjà induit des changements de croissance en forêt méditerranéenne ? Le cas du pin d'Alep et du pin sylvestre de la Sainte-Baume. *Forêt Méditerranéenne*, 29(2): 161-166.

Résumé

Cet article détaille les multiples effets néfastes des dérèglements climatiques sur toutes les composantes physiques et fonctionnelles des forêts méditerranéennes : santé, productivité, reproduction des végétaux, phénologie, fréquence et intensité des incendies et leurs conséquences, biodiversité, fertilité et fonctionnement des sols, bilan carbone. Il analyse les phénomènes et mécanismes qui conduisent aux dégâts observés sur les écosystèmes en général, précise les aspects plus spécifiques aux forêts méditerranéennes et espèces qu'on y trouve, et zoome sur le cas particulier des forêts du massif de la Sainte-Baume, et si c'est opportun sur sa « forêt sacrée » et sa fameuse hêtraie. Les forêts méditerranéennes sont actuellement en phase de dégradation plus ou moins rapide, avec une majorité d'espèces en mauvaise santé et en perte de productivité, une mortalité en hausse, une biodiversité en souffrance, des sols dont le fonctionnement et la richesse se dégradent, un risque grandissant d'incendies dont les conséquences s'aggravent. Le massif de la Sainte-Baume n'échappe pas à la règle. Pour finir sur une note plus optimiste, il présente enfin quelques moyens d'anticiper, retarder et limiter ces effets par une gestion plus active et mieux adaptée aux évolutions observées de certaines de ces forêts.