



HAL
open science

Le dépérissement du pin sylvestre dans le sud-est de la France. Des interactions complexes entre climat, topographie, sol et parasites

Jean Lemaire, Michel Venetier, Bernard Prévosto, Maxime Cailleret, Pauline Marty

► To cite this version:

Jean Lemaire, Michel Venetier, Bernard Prévosto, Maxime Cailleret, Pauline Marty. Le dépérissement du pin sylvestre dans le sud-est de la France. Des interactions complexes entre climat, topographie, sol et parasites. *Forêt Méditerranéenne*, 2024, 45 (2), pp.137-152. hal-04770101

HAL Id: hal-04770101

<https://hal.inrae.fr/hal-04770101v1>

Submitted on 7 Nov 2024

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

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

Le dépérissement du pin sylvestre dans le sud-est de la France dépend d'interactions complexes entre climat, topographie, sol et parasites

Jean Lemaire¹, Michel Vennetier², Bernard Prévosto², Maxime Cailleret², Pauline Marty³

¹- Centre National de la Propriété Forestière, Institut pour le Développement Forestier. Aix-Marseille université. jean.lemaire@cnpf.fr 175 cours Lafayette. F-69006 LYON

²- INRAE, Aix-Marseille Université, UMR RECOVER. 3275 route de Cézanne CS 40061 F- 13182 Aix-en-Provence Cedex 5. michel.vennetier@inrae.fr, bernard.prevosto@inrae.fr, maxime.cailleret@inrae.fr.

³- Centre Régional de la Propriété Forestière PACA, 7 impasse Ricard Digne - 13004 Marseille, pauline.marty@crpf.fr

Résumé

Le dépérissement des forêts s'accélère partout dans le monde, se traduisant par une baisse de leur productivité, et une augmentation du déficit foliaire et de la mortalité des arbres. Ces processus dépendent d'interactions entre de nombreux facteurs biologiques (maladies, parasites, type et structure des peuplements, ...) et environnementaux (climat, sol, topographie) agissant à des échelles différentes, ce qui les rend difficiles à prédire et à déjouer.

Notre objectif est de prédire, à l'aide de différents modèles statistiques, le déficit foliaire du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) dans le sud-est de la France, en grande partie dans un climat méditerranéen, à l'échelle de l'arbre et du peuplement. Pour cela, nous avons sélectionné 87 placettes représentatives des gradients régionaux de climat, sol, topographie et exposition, où 1740 arbres ont été étudiés. Nous avons mesuré leur déficit foliaire et leur croissance en diamètre, ainsi que les caractéristiques de leur environnement, et l'abondance de deux parasites majeurs du pin sylvestre : la chenille processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff.) et le gui (*Viscum album* L.).

Tous nos modèles font ressortir le rôle clé du gui et de la processionnaire dans le niveau de défoliation, mais surtout les très fortes interactions entre ces parasites, le bilan hydrique local (sol, topographie) et le climat des sites étudiés : le dépérissement est plus fort là où se combinent des conditions plus sèches et la présence des deux parasites.

Cette étude montre qu'il est impératif de prendre en compte de nombreux facteurs biologiques et environnementaux pour comprendre et prédire les dépérissements forestiers, et notamment ceux qui contribuent au déficit hydrique à l'échelle locale.

Abstract

Forest dieback is increasing worldwide, along with productivity losses, leaf area deficit and tree mortality. These processes depend on complex interactions between many biotic and environmental factors acting at different scales, and are thus difficult to address and predict.

Our aim was to build several statistical models of tree- and stand-level foliar deficit (a proxy for tree decline) for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in southeastern France, mainly in a Mediterranean climate. To this end, we quantified foliar deficit in 1740 trees from 87 plots distributed along combined environmental gradients. We also measured tree annual radial growth and the abundance of two parasites: the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff.) and mistletoe (*Viscum album* L.). Topographic, soil, climate and water balance indices were measured or computed for each plot, together with the stand dendrometric characteristics.

All the models pointed to a preponderance of the biotic factors (processionary moth and mistletoe) in explaining the intensity of foliar deficit. We also showed that strong interactions between climate, soil, water balance and biotic factors help explaining the intensity of tree

and stand dieback. Dieback was thus greater in the driest topographic and climatic conditions where the mistletoe and processionary moth were present.

This study highlights the need to account for a wide range of biotic and abiotic factors to explain the complex process of forest dieback, and especially the environmental variables that contribute to the water balance on the local scale.

1. Introduction

Depuis le début de l'ère industrielle au milieu du 19^{ème} siècle, les activités humaines ont provoqué un réchauffement du climat de l'ordre de 1,2°C à l'échelle de la planète et de 1,6°C sur les terres émergées (Masson-Delmotte et al., 2021). Suivant les derniers scénarios de limitation des émissions de gaz à effet de serre dans les décennies à venir, et en tenant compte de la tendance actuelle, cette hausse devrait atteindre entre 2,5°C et 5,7°C en 2100 au niveau mondial. Elle s'accompagne d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité de phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes. On retrouve bien sûr ces deux phénomènes à l'échelle de la France, puisque 8 des 10 dernières années figurent parmi les plus chaudes jamais enregistrées, 2022 étant la plus chaude de toutes et 2023 la seconde, en ayant largement battu plusieurs records mensuels.

Les zones méditerranéennes se réchauffent encore plus vite que la moyenne des continents et, en France, que la moyenne nationale. L'augmentation des températures annuelles y atteint déjà 2°C (AIR, 2016). On y redoute dans le futur des pics de canicules dépassant régulièrement 50°C (Bador et al. 2017), accompagnées de sécheresses prolongées et répétées, mais aussi des pluies exceptionnelles engendrant plus d'inondations et d'érosion. Une tendance déjà bien amorcée dans le sud-est de la France, comme le montrent les 9 dernières années (2015-2023) qui ont presque toutes connu des sécheresses plus longues ou intenses que la normale (DSF, 2023), des pics de température supérieurs à 45°C, et plusieurs épisodes de pluies extrêmes dépassant 400 mm en moins de 48h.

Ces événements extrêmes et fréquents provoquent des stress intenses pour les écosystèmes; et notamment une forte hausse des dépérissements forestiers, perceptible à l'échelle mondiale depuis plus de 30 ans (Allen et al. 2010), souvent doublée d'une baisse significative de productivité de ces forêts. En France, toutes espèces confondues, la mortalité a augmenté de 50% et la productivité perdu 10% sur la dernière décennie par rapport à la précédente (IGN – Inventaire Forestier National, 2021, 2022). Le Département Santé des Forêts (DSF, 2022a) confirme sur son réseau de suivi permanent une forte augmentation du déficit foliaire des feuillus et résineux depuis 1997 et de leur taux de mortalité depuis 2017. Ce phénomène n'épargne d'ailleurs pas les principales essences méditerranéennes : les chênes pubescent et vert, ainsi que les pins d'Alep et sylvestre (Vennetier, 2023).

Les symptômes de dépérissement des arbres sont variés : on assiste à une réduction de leur croissance en diamètre et hauteur, du nombre de branches ce qui affecte le développement de leur houppier (Sabatier et al., 2013), de leur surface foliaire à travers une baisse de la taille et du nombre de feuilles ou d'aiguilles (Vennetier et al., 2013), et de leur reproduction (Girard et al., 2012). En plus des symptômes visibles, on observe chez les arbres dépérissants des dysfonctionnements physiologiques comme l'embolie des vaisseaux conducteurs de sève ou la baisse des réserves carbonées (Huc, 2011). Cela les prive, entre autres, d'une énergie nécessaire à leur défense contre les agresseurs, qu'il s'agisse d'insectes ou de champignons (DSF, 2022b). Les dépérissements sont pour une large partie liés aux stress climatiques qui peuvent cependant être fortement modulés par les conditions locales, et notamment le bilan hydrique lié au sol, à la topographie, à l'exposition (Ripert et al., 2002). Ce bilan hydrique local joue un rôle clef depuis toujours dans la région méditerranéenne, et un rôle croissant dans de nombreuses autres régions où les sécheresses et canicules, jadis rares et peu intenses, prennent de plus en plus d'importance (Lemaire et al., 2022a).

Le pin sylvestre est l'une des principales espèces forestières d'Europe où il couvre 28 millions d'hectares, et d'Eurasie sur une surface encore plus vaste. Il s'étend en latitude du nord de la Scandinavie au sud de l'Espagne, et en longitude jusqu'en Sibérie orientale, en passant par les montagnes du nord du Moyen-Orient. C'est ainsi le pin le plus répandu au monde.

Il est aussi le pin le plus fréquent dans les forêts du sud-est de la France (Médail, 2001), qu'il domine tant en surface couverte qu'en volume de bois sur pied. Espèce pionnière, il a colonisé naturellement de nombreuses terres abandonnées par l'agriculture depuis 200 ans, et a aussi été planté pour la protection des sols érodés. Le pin sylvestre est peu sensible au froid, modérément résistant à la sécheresse, et il s'adapte à une grande variété de sols qu'ils soient acides ou basiques (pH 4,5 à 9). C'est pourquoi il s'y trouve dans une gamme très large d'altitude (300-1600 m), et de températures et précipitations moyennes annuelles (de 4.2 à 13°C, et de 680 à 1200 mm). Il accompagne aussi bien le chêne pubescent dans les climats supra-méditerranéens, que le hêtre ou le sapin dans les climats plus montagnards, et fait quelques incursions dans le méso-méditerranéen, héritage d'un climat jadis plus froid.

Son importance écologique et économique en fait, à l'échelle mondiale, l'une des essences les plus étudiées. Ce qui a permis de constater qu'il était, depuis une quarantaine d'années, soumis à des dépérissements dans toute son aire de répartition, mais plus fortement à ses limites sud. Le changement climatique est presque systématiquement pointé du doigt dans ces dépérissements, à travers des sécheresses et canicules fortes ou répétées, et l'influence de certains parasites.

Dans le sud-est de la France, plusieurs épisodes de dépérissement du pin sylvestre ont été documentés depuis 40 ans (Lieutier et al., 1988, Sardin, 1997; Pauly and Belrose, 2005; Thabeet *et al.*, 2009, Marty et al. 2018, DSF, 2020a.). Ils confirment tous le rôle des stress climatiques répétés ou combinés avec des conditions locales défavorables ou des agresseurs biotiques : sécheresses et casses de neige massives suivies d'attaques d'insectes (scolytes) dans les années 80, invasion du gui (*Viscum album*) sur des arbres vieillissants en milieux difficiles (peuplements RTM) dans les années 90, sécheresses fortes et répétées accompagnées de canicules (périodes 2003-2007 et 2015-2023). Les parasites et particulièrement le gui et la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* - que nous appellerons "processionnaire" dans le reste de l'article), sont régulièrement évoqués (Marty et al., 2018), confirmant les études de nombreux autres pays (Espagne, Suisse, etc.). Les champignons pathogènes (ex : *Diplodia sapinea*) et les scolytes (ex : *Ips sexdentatus*) sont de plus en plus fréquemment mis en cause (DSF 2020b). La densité et l'âge des peuplements sont aussi cités, (Vennetier 2023), ainsi que le rôle des mélanges d'espèces : dans les forêts mixtes, notamment entre pin sylvestre et chênes, toutes les espèces ne bénéficient pas forcément du mélange. En effet les interactions entre espèces, dépendent de leur identité, de la fertilité du site, et de l'intensité des stress climatiques (Korboulewsky et al., 2021). Pour comprendre et prédire les dépérissements, il est donc essentiel d'étudier les nombreuses et complexes interactions entre les caractéristiques des peuplements, celles du milieu, le climat et les facteurs biotiques.

De nombreux modèles mathématiques, très variés dans leur conception et les facteurs pris en compte, ont été développés pour expliquer ou prédire les dépérissements des forêts. Certains de ces modèles simulent explicitement les mécanismes du dépérissement en se basant sur les processus physiologiques et écologiques. Ils demandent des données précises à haute résolution qui sont souvent couteuses et difficiles à obtenir sur un grand nombre de sites, et sont trop complexes pour être utilisés opérationnellement par les professionnels techniques sur le terrain.

Nous avons donc cherché à combler ce vide en proposant des modèles de prédiction de la défoliation combinant les facteurs biotiques et abiotiques. Ces modèles ont été développés à partir (1) de données facilement accessibles, (2) d'outils techniques et numériques simples à manipuler, et (3) d'un guide pratique pour des relevés de terrain, basé sur des concepts familiers à ces forestiers. Ces modèles devaient combiner tous les facteurs potentiels du dépérissement, et prendre en compte leurs interactions.

2. Matériel et méthodes

2.1 Échantillonnage

Notre zone d'étude se situe dans l'arrière-pays de la région Sud - Provence-Alpes-Côte d'Azur, au sud-est de la France (Figure 1).

En se basant sur les travaux antérieurs pour le pin sylvestre dans cette région (Thabeet, 2008) et sur les facteurs déterminants du bilan hydrique en région méditerranéenne (Ripert et al. 2002), nous avons croisé trois critères pour structurer notre échantillon de placettes.

- L'altitude en deux classes, de part et d'autre du seuil de 1200 m. Il correspond globalement à la limite entre deux bioclimats, supra-méditerranéen et montagnard, et à une discontinuité dans l'intensité des dépérissements observés entre 2003 et 2006.
- La pente et l'exposition combinées en trois classes, sur la base de l'indice de Becker (1984), l'IKR¹. Cet indice se fonde sur l'énergie solaire reçue au niveau du sol pour définir des versants chauds ($IKR \geq 1.05$), neutres ($0.95 \leq IKR < 1.05$) ou frais ($IKR < 0.95$).
- La position topographique en trois classes. Elle se base sur un indice (TPI_100), calculé sur un modèle numérique de terrain (© BDALTI IGN), par un logiciel SIG, en utilisant un rayon de 100m autour du point à évaluer. Elle définit des situations favorables pour le bilan hydrique (bas de pente, fond de vallon ; $TPI_{100} < -0.8$), neutres (mi-pente, plateaux; $-0.8 < TPI_{100} < 0.8$) ou défavorables (haut de versant, crêtes; $TPI_{100} > 0.8$).

Le croisement de ces trois critères définit 18 combinaisons (2x3x3). Pour chaque combinaison, cinq placettes ont été tirées au sort aléatoirement (soit 90 en tout) sur une grille carrée de 50x50m, positionnée sur la carte des peuplements de la région PACA où le pin sylvestre en peuplement forestier est dominant (> 75% ; © BDFORET v2 IGN). Sur le terrain, nous avons vérifié que les sites tirés au sort étaient accessibles, ne présentaient pas de signes d'exploitation récente (< 10 ans) ou de perturbation importante (sentier, route, érosion, ...), que les peuplements étaient suffisamment dense (pas d'arbres très isolés) et faisaient au moins 3 mètres de haut et les arbres au moins 10 cm de diamètre moyen, qu'au moins 20 pins sylvestres dominant ou co-dominants étaient présents dans des conditions de milieu pas trop hétérogènes. Les sites ne répondant pas à ces critères ont été remplacés par d'autres sites équivalents tirés au sort. La surface des placettes mesurées varie de 235 à 2375 m², pour inclure au moins 20 pins. Trois placettes ont été éliminées après mesures car trop particulières (peuplements très isolés en climat méso-méditerranéen, très loin de toutes les autres placettes, à très basse altitude), les analyses portent donc sur 87 placettes.

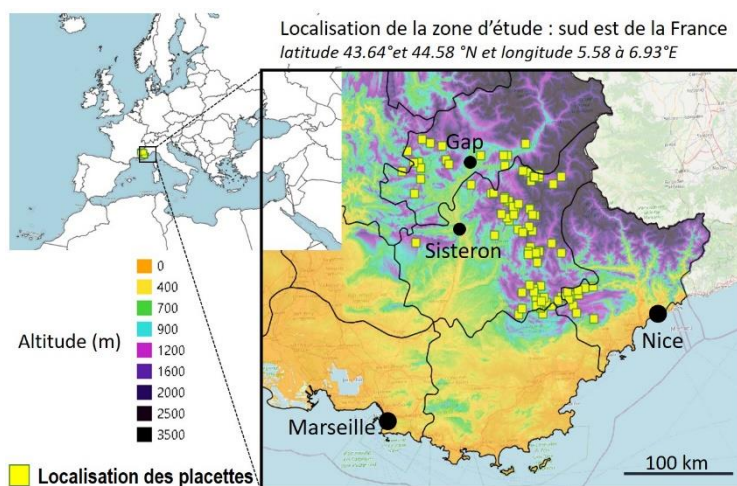


Figure 1. Localisation des 87 placettes de pin sylvestre inventoriées (latitude 43.64–44.58 °N, longitude 5.58–6.93°E).

¹L'indice de climat lumineux de Becker (IKR) est le rapport entre l'énergie solaire reçue annuellement par un site, en lien avec sa combinaison d'exposition et de pente, et celle que recevrait localement le même site projeté à l'horizontale (plaine ou plateau).

2.2 Données mesurées sur les arbres

Durant la saison de végétation de 2017, sur chaque placette, nous avons mesuré la surface terrière (surface cumulée des troncs des arbres à 1,30 m du sol, un indicateur de la densité et du volume des peuplements), le diamètre et l'état de santé des 20 pins sylvestres dominants ou co-dominants les plus proches de son centre, soit 1740 arbres. Cette notation sanitaire est basée sur les protocoles DEPERIS du Département Santé des Forêts (Goudet et al., 2018 ; cf. fig 2 pour exemples). Sur le houppier fonctionnel (hors compétition avec un voisin), on note le déficit foliaire (= def ; par classes de 5%), la microphyllie (pourcentage d'aiguilles d'une longueur inférieures ou égales à 50% de la longueur normale pour le pin sylvestre dans cette région = mic), l'abondance relative du gui (en pourcentage du houppier vivant = %gui) et le nombre de nids de processionnaires (= Nbnids). Le niveau total de défoliation (Défol) est calculé en combinant le déficit foliaire et la microphyllie suivant la formule :

$$\text{Défol} = \text{def} + (100 - \text{def}) * \text{mic} * 0.5$$



Figure 2. Exemple de photos de référence du protocole DEPERIS pour estimer visuellement le déficit foliaire du pin sylvestre. Source: Müller and Stierlin (1990)

Sur un sous-échantillon de 28 placettes tirées au sort, représentatives des mêmes 18 combinaisons des trois critères principaux, nous avons prélevé deux carottes sur chacun des 15 arbres les plus proches du centre de la placette (402 arbres = 804 carottes). Après séchage et ponçage des carottes, les largeurs de cernes ont été mesurées au laboratoire, ce qui a permis : (1) de déterminer l'âge des arbres, et (2) de calculer leur croissance moyenne pour toute leur vie et pour trois périodes spécifiques: 2003-2007 (période de forte sécheresse pluriannuelle), 1997-2002 (période précédant -) et 2008 - 2016 (période suivant la sécheresse).

La présence et l'importance du gui et de la processionnaire sur un site donné peuvent être liées à la proximité et à la densité, dans les paysages des alentours, des différentes espèces de pins sur lesquelles ils peuvent proliférer. L'abondance de ces pins favorise le maintien de populations importantes et les contaminations croisées entre espèces. Nous avons donc calculé les surfaces totales (indice S.pins) occupées par l'ensemble de ces espèces dans un rayon de 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 16, 32 et 64 km autour de chaque placette : pin sylvestre, pin noir et pin laricio pour le gui, les mêmes plus le pin d'Alep pour la processionnaire. Nous avons retenu dans les calculs le rayon pour lequel la corrélation était la plus forte avec le déficit foliaire.

2.3 Données et indices climatiques

Les données climatiques ont été obtenues en associant les informations issues de plusieurs modèles climatiques (annexe 1). Elles comprennent (1) les moyennes mensuelles des pluies (P) et des températures (T, maximales, minimales, moyennes) pour la période 1981-2010,

(2) les valeurs extrêmes des températures négatives d'hiver (Tnabs), qui sont essentielles pour expliquer la survie des chenilles de la processionnaire dans leurs nids, (3) la moyenne mensuelle de l'énergie solaire reçue au sol à une résolution de 50 m, qui contribue fortement au microclimat local (qui n'est pas utilisée seule mais pour calculer les indices d'ETP, cf. ci-dessous), (4) l'évapotranspiration potentielle (ETP), une mesure qui combine la demande en eau du sol par la végétation et l'évaporation pour déterminer le bilan hydrique climatique (P-ETP). Un P-ETP négatif signifie que la demande en eau pour le sol dépasse l'apport par les pluies, créant potentiellement un stress hydrique pour la végétation. Ces variables climatiques ont aussi été moyennées pour l'été (juin-août, P-ETP_06-08), pour la saison de végétation (avril-octobre, P-ETP_04-10), et enfin pour la saison de repos hivernal (novembre-mars, P-ETP_11-03), essentielle pour la dynamique de la processionnaire (Robinet et al. 2007, 2014).

Les deux parasites sont limités en altitude et latitude par les températures très basses en hiver. Le gui est aussi favorisé par des températures élevées en été. Nous avons intégré pour le gui un indice (Skre) basé sur ces deux critères, formalisé par Skre (1979) pour la Scandinavie (annexe 1).

2.4 Données de sol et de topographie

Les relevés de terrain sont réalisés suivant les recommandations du Guide Technique pour l'évaluation des potentialités forestières en régions méditerranéennes (Ripert et al. 2002).

Les données sont nécessaires à deux échelles :

- d'une part, elles sont relevées sur la placette et son environnement immédiat. La topographie est estimée visuellement sur la placette et sur carte à l'échelle du versant. Il s'agit de déterminer si elle a tendance à concentrer ou retenir l'eau qui arrive de l'amont, ou au contraire si elle favorise son départ ou son détournement hors placette. La géologie (nature et structure de la roche mère, fissuration, altération) est interprétée à partir des cartes et des éléments visibles dans le paysage, sur la placette et dans ses alentours : affleurements rocheux, falaises, talus de route, etc.). Le sol (profondeur, structuration en couches, texture, teneur en éléments grossiers, pH) est étudié sur la placette elle-même, à l'aide de fosses pédologiques creusées manuellement et de sondages à la tarière, en tenant compte de la structure géologique et de la topographie.

En combinant l'ensemble de ces facteurs, on calcule l'indice topoédaphique (TEI) de chaque placette à l'aide de la grille définie dans ce guide technique et adapté par Vennetier *et al.* (2018) pour étudier la productivité forestière. Cet indice est un bon indicateur du bilan hydrique local.

D'autre part, trois indices topographiques sont calculés sur SIG à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT). Deux indices de position topographique : le TPI_100, déjà utilisé pour la stratification de l'échantillon (cf. *paragraphe 2.2*), avec un MNT d'une précision de 25 m; et le TPI_1500, similaire mais à plus large échelle (rayon de 1500 m et MNT à 75 m). Mais également l'indice d'humidité topographique (TWI), rapport entre la surface en amont d'un point d'où l'eau est susceptible de provenir et la pente au niveau de ce point (rayon de 1500 m, MNT à 75 m).

2.5 Analyses statistiques

On trouvera dans l'article de Lemaire et al. (2022b) les détails scientifiques sur les méthodes statistiques dont nous résumons ci-dessous les bases essentielles.

Nous cherchons à prédire (modéliser), avec l'ensemble des variables environnementales mesurées ou calculées décrites ci-dessus (cf. tableau 1) : (a) l'intensité de la colonisation des pins sylvestres par le gui (%gui, modèle i-Gui) et par la processionnaire (Nbnids, modèle i-Nids), et (b) trois variables illustrant le dépérissement de ces pins (défoliation) : la première à l'échelle individuelle des arbres (Défol = % de défoliation), les deux autres au niveau des peuplements. Pour ces deux dernières, on considère :

- d'une part le pourcentage d'arbres défoliés à 50% ou plus (X50). Cette variable a été préférée à la moyenne de défoliation des arbres sur une placette, car elles sont très corrélées

et que X50 est l'indice utilisé pour évaluer la santé et le dépérissement des forêts à l'échelle nationale et européenne. Un arbre est en effet considéré comme dépérissant si son déficit foliaire est d'au moins 50%.

- d'autre part la probabilité (P30) que plus de 30% d'arbres soient dépérissants dans une placette, seuil de fréquence au-dessus duquel c'est le peuplement lui-même, dans son ensemble qui est considéré comme dépérissant. Le seuil de 20%, habituellement retenu à l'échelle européenne pour toutes les espèces n'a pas été utilisé ici, car toutes nos placettes seraient alors considérées comme dépérissantes. Il n'aurait donc pas été possible d'effectuer des analyses statistiques sur cette variable. Ce choix d'un seuil élevé traduit le mauvais niveau de santé général du pin sylvestre dans le sud-est de la France.

	Variable à expliquer
Indices de colonisation potentielle : par le gui (i-Gui), et par la processionnaire (i-Nids)	%gui <i>Pourcentage moyen occupé par gui dans la surface foliaire (le houppier vivant) des arbres de la placette</i>
	Nbnids <i>Nombre moyen de nids de processionnaire par arbre dans la placette</i>
Indices de dépérissement des arbres et des peuplements	Défol <i>Pourcentage de déficit foliaire total par arbre</i>
	X50 <i>Pourcentage d'arbres par placette avec au moins 50% de déficit foliaire</i>
Indice de risque de dépérissement	P30 <i>Dépérissement si présence d'au moins 30% d'arbres avec un déficit foliaire \geq 50%</i>

Nous avons modélisé les 5 variables à prédire (*tableau n°1*), à l'aide de deux variantes de la régression PLS (partial least square regression, Cf. *détails en annexe n°2*). Cette méthode d'analyse multivariée a l'avantage d'être peu sensible aux corrélations entre variables explicatives, et de permettre l'utilisation de très nombreuses variables même avec un nombre limité d'observations.

Tableau 1. Correspondance entre les indices modélisés et les variables à expliquer.

Pour évaluer le poids relatif des trois groupes de variables explicatives (biotiques = parasites et caractéristiques des peuplements / climatiques / topoédaphiques) et leurs interactions, nous avons réalisé une "partition par groupes" de la variance expliquée dans les modèles pour l'indice de défoliation X50 et les indices de colonisation (i-gui et i-nids). L'analyse (diagramme de Venn, cf. *fig. 6*) donne à la fois le poids total de chaque groupe (pourcentage de variance qu'il explique), et dans ce poids total par groupe, celui qui est partagé avec un ou plusieurs autres groupes, correspondant à leurs interactions.

Les calculs statistiques ont été réalisés avec le logiciel R 4.0.5 (RStudio Team, 2021).

3. Résultats

3.1 Des peuplements d'âge et de structure très variés.

L'âge moyen des arbres étudiés (sur les 30 placettes du sous-échantillon) est de 88 ans, mais avec une forte variabilité (30-198 ans, *fig. 3a*), et différents pics successifs centrés autour de 60, 75, 90 et 125 ans. Ces pics correspondent bien aux vagues d'abandon des terres à la fin du 19^{ème} siècle, après la première guerre mondiale puis durant la seconde guerre mondiale et dans les années 1950. L'âge moyen des placettes est au contraire régulièrement distribué, de 53 à 139 ans, avec une forte variabilité des âges au sein de certaines placettes (*fig 3c*) : la moitié des placettes montre des écarts supérieurs à 50 ans parmi les arbres dominants, dont plusieurs des différences de 100 ans ou plus. C'est donc autant au sein même des peuplements qu'à l'échelle des paysages que se sont produites les différentes vagues de régénération mentionnées pour les arbres. Ces vagues peuvent être liées aux variations d'usage des terres (abandon du pâturage en forêt), aux interventions

humaines (coupes d'éclaircies) ou aux perturbations naturelles (tempête, incendie, casses de neige massives...)

Les diamètres du pin sylvestre sont faibles dans toute la zone d'étude, avec une moyenne de 25 cm à l'échelle de l'individu (10 à 82 cm) comme de la placette (15 à 39 cm). Un maximum d'effectifs se trouve entre 20 et 28 cm pour les placettes, et entre 15 et 35 cm pour les arbres (fig. 3b et 3d). Le pic bien marqué de vieux arbres centré sur 125 ans ne se traduit pas par un pic significatif dans les valeurs supérieures des diamètres. La croissance en diamètre des arbres est donc faible, d'autant plus qu'ils sont vieux, avec une moyenne de 3 mm/par an. Elle traduit la faible fertilité des terres conquises par le pin sylvestre, notamment des zones pastorales abandonnées en priorité lors de l'exode rural, et la rudesse du climat méditerranéen pour cette espèce, qui représente les limites chaudes et sèches de son aire.

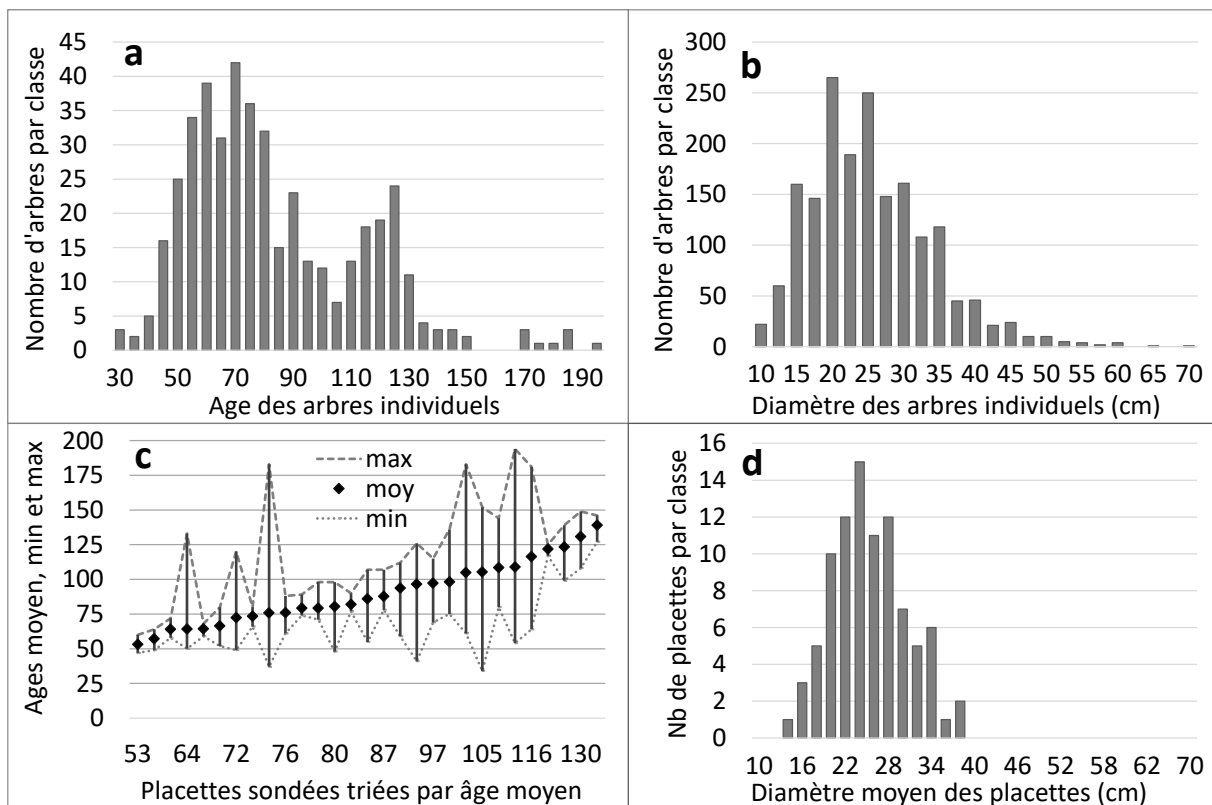


Figure 3. Classes d'âge et de diamètre des arbres individuels et des placettes de pins sylvestres (fig. 3a, b et d). La figure 3c donne l'amplitude des âges des arbres au sein des placettes de part et d'autre de leur moyenne.

Variable	Moyenne	Min	Max
Age (années)	88	53	139
Diamètre à 1,30m (cm)	25	15	39
Surface terrière (m ² /ha)	23.1	8	48
Défol (%)	48.3	25.8	84.5
X50 (%)	31	0	90
Nbnids	0.66	0	6
%gui	8.1	0	29

Tableau 2. Caractéristiques des peuplements échantillonnés sur les 87 placettes (cf. variables dans le tab. 1)

A l'échelle de la placette, la présence et l'abondance du gui et de la processionnaire sont très variables : de 0 à 29% de gui et de 0 à 6 nids dans les houppiers (tableau 2). Mais à l'échelle de l'individu, certains pins ont jusqu'à 70% de leur houppier occupé par le gui, et d'autres possèdent jusqu'à 12 nids.

3.2 La santé du pin sylvestre dépend des conditions de milieu

L'état de santé du pin sylvestre sur la zone d'étude est globalement mauvais. La défoliation moyenne des arbres par placette est de 48% (de 25.8 à 84.5%). Aucune placette ne peut être considérée comme bien portante (la défoliation moyenne des arbres y est toujours supérieure à 25%). Même individuellement, quasiment aucun arbre n'est sous le seuil de 20%. La moitié des placettes est considérée comme dépérissante ($X_{50} \geq 30\%$). Bien que quasiment partout élevés, les niveaux de dépérissement sont modulés par les conditions stationnelles : altitude, exposition, sol et topographie (fig. 4).

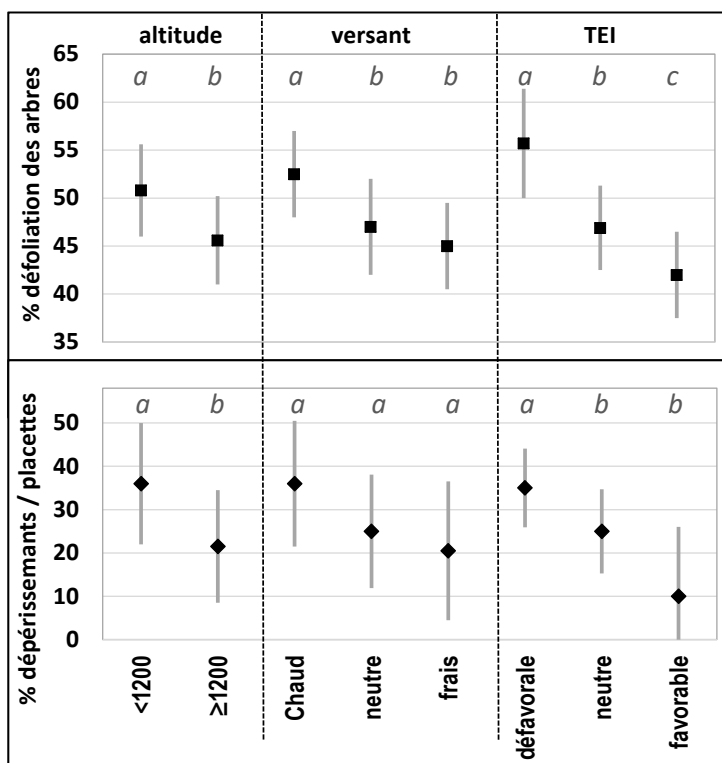


Figure 4. Déficit foliaire des arbres individuels (Défol, en haut) et proportion d'arbres dépérissants par placette (X_{50} , au bas), en fonction des classes d'altitude, d'IKR du versant et d'indice topoédaphique (TEI). Les carrés et losanges noirs représentent les médianes, les barres verticales grises l'intervalle de confiance de ces médianes calculé par bootstrap. Les groupes partageant la même lettre (a, b ou c) dans chacune des six parties de la figure ne sont pas significativement différents. Les différences significatives entre classes ont été validées par analyse de variance et test de Tuckey.

La défoliation des arbres (Défol) et le pourcentage d'arbres dépérissants par placette (X_{50}) répondent de façon similaire aux trois facteurs structurant l'échantillonnage (altitude, IKR, topographie). Ils sont significativement plus élevés en dessous de 1200 m d'altitude, lorsque la topographie (TEI) est défavorable, et à l'échelle des arbres (Défol) sur les versants chauds. Cependant cette différence entre versants, bien que prononcée, n'est pas significative sur la moyenne par placette, en raison de la forte variabilité au sein des placettes, dont témoigne les larges intervalles de confiance.

De façon logique, les sites combinant deux facteurs défavorables sur trois sont en moyenne plus dépérissants que ceux qui n'en présentent aucun ou un seul. Les sites qui cumulent les trois facteurs défavorables (altitude <1200 m + versant chaud + situation topoédaphique défavorable) sont significativement plus dépérissants que toutes les autres combinaisons. Inversement, la combinaison de deux facteurs favorables, que le troisième soit défavorable ou neutre, diminue le plus souvent significativement le dépérissement (cf. Lemaire et al. 2022b pour les tests statistiques).

3.3 Le gui et la processionnaire répondent fortement à leur environnement

Les indices de colonisation par le gui et par la processionnaire dans le houppier des pins sylvestre (i-Gui et i-Nids) dépendent tous deux des 3 groupes de facteurs : biotiques, climatiques et topoédaphiques (cf. fig. 5 et 6). Ils sont corrélés à la surface cumulée des peuplements des différents pins qu'ils peuvent parasiter dans les alentours (S.Pins), les rayons de respectivement 8 km et 6 km s'étant avérés les plus pertinents. Ils sont aussi tous les deux plus élevés dans les situations de sol et de topographie défavorables, que ce soit à l'échelle locale (TEI) ou à celle du paysage (TPI).

Le gui est aussi plus abondant dans les sites avec un fort déficit hydrique climatique (P-ETP ; calculé durant toute la saison de végétation et en hiver), et quand les températures de janvier et juillet (indice de Skre) sont élevées (fig. 5.a). Dans ce modèle de prédiction du gui, les variables climatiques ont toutes deux fois plus de poids que les autres variables significatives, ce qui souligne le rôle clef du climat dans sa dynamique.

Le nombre de nids de processionnaire (fig.5.b) augmente par ailleurs avec les hivers chauds (fort ETP_11-03) et des températures minimales absolues élevées (Tm.abs), donc l'absence de grands froids hivernaux.

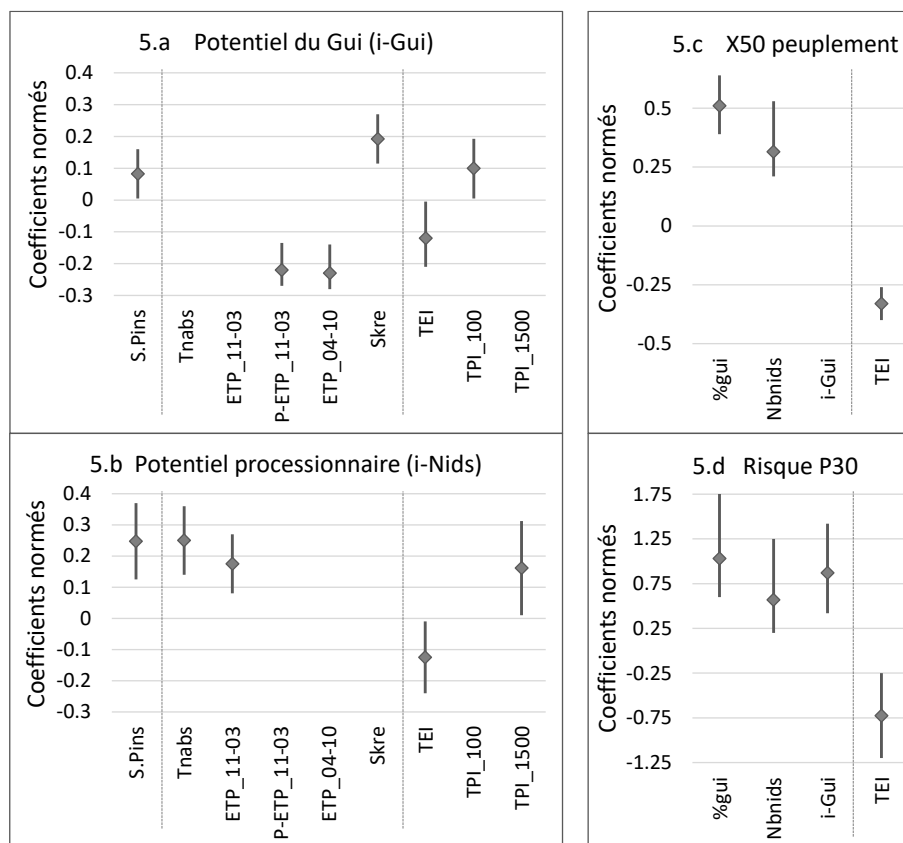


Figure 5. Coefficients de corrélation partielle normés (valeur moyenne et intervalle de confiance) des variables significatives retenues dans les modèles PLS, pour la colonisation par le gui (i-Gui) et la processionnaire (i-Nids), le dépérissement observé des peuplements (X50) et le risque estimé de dépérissement (P30). La valeur absolue de ces coefficients donne le poids relatif des variables dans chaque modèle, leur signe indique si ces variables ont un effet positif ou négatif sur l'indice concerné.

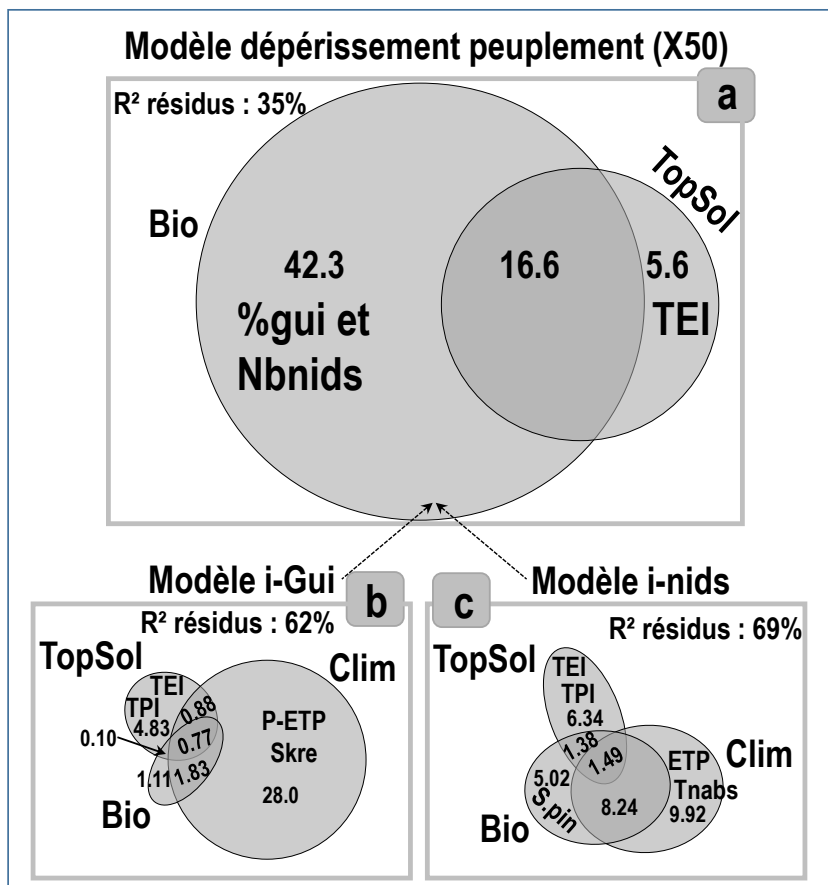
S.Pins est l'indice de présence des espèces de pins attaqués par le gui ou la processionnaire dans un rayon de 8 ou 6 km respectivement; Tnabs est la température minimum absolue annuelle (°C). Pour les variables P-ETP et ETP (bilans hydriques climatique), les chiffres qui suivent indiquent la période de calcul (par ex. : P-ETP_11-03 = novembre à mars; Skre est l'indice de Skre (cf. annexe 1).; TEI l'indice topoédaphique; TWI l'indice d'humidité topographique; TPI_100 et TPI_1500 les indices de position topographique calculés sur un rayon de 100m et 1500m. Tous les indices climatiques sont calculés sur la période 1981-2010.

3.4 De nombreuses interactions modulent le dépérissement

Modèles de défoliation

Le modèle de défoliation à l'échelle des peuplements (X50, fig. 5c) a un fort coefficient de corrélation ($r^2=0.65$) et de prédiction ($Q^2=0.62$), bien qu'il ne soit basé que sur trois variables : %gui, Nbnids et TEI. L'abondance du gui et de la processionnaire augmente la défoliation, et contribue majoritairement au dépérissement (fig. 6a). Des conditions topoédaphiques défavorables sont associées à une plus forte défoliation, mais elles expliquent peu de variance à elles seules, car elles agissent surtout en interaction avec le gui et la processionnaire.

Dans ce modèle "peuplement", le climat ne ressort pas directement. Il est masqué par les effets du gui et de la processionnaire, qui tous deux intègrent déjà, dans leur répartition et leur abondance, le climat et les facteurs topoédaphiques (fig. 5.a, 5.b, 6.b et 6.c). Pour le gui, les facteurs climatiques sont prédominants, comme expliqué précédemment, même s'ils montrent des interactions significatives avec les autres groupes (fig. 5.a et 6.b). Pour la processionnaire, les interactions entre les trois groupes sont très fortes (fig. 6.c). Il y a donc finalement, à tous les niveaux du processus de dépérissement du pin sylvestre, une forte interaction entre les trois classes de variables explicatives : (1) biotiques (parasites = %gui et Nbnids, abondance des pins sensibles dans un rayon de 6 ou 8 km = S.Pins), (2) sol et topographie (TEI, TPI) et (3) climat (P-ETP, ETP, Skre, Tnabs).



Nous ne présentons pas ici en détail, ni en diagramme de Venn, le modèle prédisant le déficit foliaire des arbres individuels (Défol). Il est beaucoup plus complexe que le modèle de défoliation des peuplements (X50), car il retient 12 variables. Cependant, les trois variables de loin les plus influentes sont les mêmes, confirmant leur rôle prépondérant : le gui et la processionnaire, suivies des conditions topoédaphiques, puis les bilans hydriques climatiques d'hiver et d'été. S'y ajoutent de nombreuses caractéristiques des arbres et des

peuplements qui jouent un rôle significatif, bien que secondaire : diamètre et hiérarchie de l'arbre, densité du peuplement, variations de la croissance passée (cf. Lemaire et al. 2022b).

Modèle de risque de dépérissement (P30) à l'échelle de la placette

Ce modèle de risque est assez performant : son taux d'erreur de classification n'est que de 21.6%, soit près de 4 placettes sur 5 correctement prédites. Il a cependant tendance à légèrement surestimer le pourcentage de dépérissement dans les valeurs intermédiaires de risque (entre 20 et 80%, *Figure 7*). Quatre variables sont significatives dans ce modèle, dont deux liées au gui : l'indice de colonisation potentielle (i-gui), avec ses nombreuses composantes décrites précédemment dont le climat, et la présence effective du gui sur place (%gui). Les deux autres sont la topographie (TPI) et l'abondance de la processionnaire relevée sur le terrain (Nbnids). L'indice de colonisation potentielle par la processionnaire n'était pas significatif au seuil de 5% dans ce modèle, mais de très peu ($p=0.06$). Cette proximité d'effet est logique vu sa redondance avec celui du gui, qui ici masque son action, partageant avec lui les impacts favorables sur son abondance d'un climat plus chaud, de conditions topographiques défavorables et d'abondance des pins aux alentours (*fig 6.a et b*).

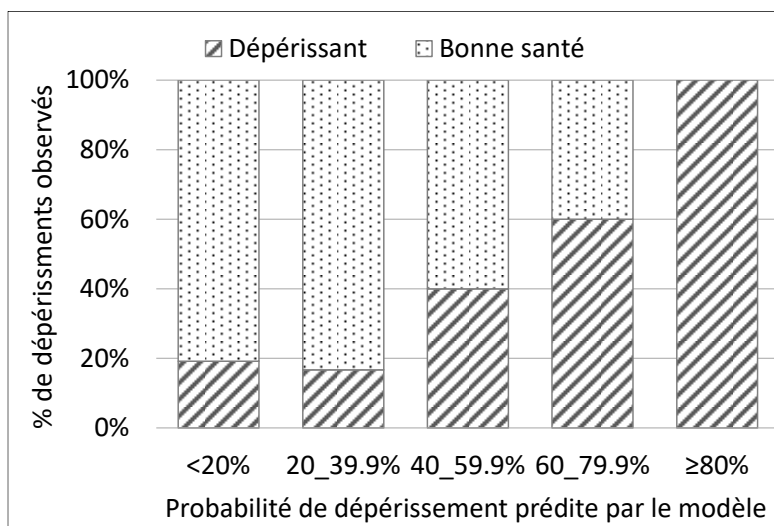


Figure 7. Répartition des pourcentages de dépérissement de placettes observés sur le terrain (proportion de cas où $X_{50} \geq 30\%$) par classe de prédiction de ce dépérissement par le modèle de risque (P30).

4. Discussion

Le dépérissement des forêts est un phénomène complexe. Cette étude confirme que son étude demande la prise en compte simultanée de nombreux facteurs du milieu, à la fois biotiques (parasites, caractéristiques des peuplements) et abiotiques (sol, topographie, climat), et de leurs interactions.

4.1 Le rôle clé des facteurs biotiques

Le gui et la processionnaire jouent un rôle majeur dans la défoliation du pin sylvestre dans le sud-est de la France. En intégrant leurs interactions avec les facteurs abiotiques illustrées par la figure 7, ils représentent presque 65% de la variance expliquée dans l'indice de dépérissement des peuplements (X_{50}). Ils dominent aussi le modèle des arbres individuels.

Le gui puise l'eau dans la sève brute des arbres qu'il parasite et ne régule pas sa consommation d'eau en période de sécheresse (il ne ferme pas ses stomates). Il accentue ainsi le stress subi par l'arbre. En conséquence, les arbres gâtés ferment leurs stomates plus rapidement que ceux non-parasités. Cela réduit la quantité de carbone qu'ils assimilent par photosynthèse. Le gui puise également dans la sève brute des éléments nutritifs qu'il stocke dans ses propres branches et feuilles, provoquant des carences pour l'arbre. Tout cela affaiblit les arbres gâtés, limite leur croissance et leurs réserves, et donc la taille et la

longueur de leurs branches et de leurs feuilles ou aiguilles. Mais ça réduit aussi leur résistance aux attaques de pathogènes et d'autres parasites et aux stress climatiques. Pour de forts pourcentages de gui dans les houppiers, les pertes de productivité ont ainsi été estimées entre 29% et 64% à l'échelle de peuplements de pin sylvestre, en Suisse et Espagne respectivement. Dans notre zone d'étude, les pertes de productivité sont du même ordre de grandeur, et elles s'accroissent progressivement avec le temps : au-delà de 40 ans d'infestation par le gui, les arbres ne montrent plus aucune résilience aux fortes sécheresses, ce qui les conduit à un dépérissement rapide (*Marty et al. 2018*).

En peuplements forestiers, le gui qui est héliophile se concentre généralement dans le haut du houppier. D'une part car il manque de lumière dans sa partie basse, mais aussi parce que les oiseaux qui disséminent ses graines (notamment les grives) se posent le plus souvent à la cime des arbres. Mais quand le haut du houppier dépérit, l'arrivée de lumière et la moindre interception de ses graines lui permet d'accroître sa progression vers la base des houppiers, ou d'y accélérer son développement s'il y était précédemment établi.

Notre zone d'étude confirme aussi le poids important du climat (indice de Skre) et de la structure paysagère dans la présence du gui. L'élévation des températures lui a permis de gagner plusieurs centaines de mètres en altitude et d'accroître sa progression et sa densité vers le nord depuis un siècle. Mais les densités de populations d'oiseaux disperseurs de ses graines, qui dépendent largement d'autres espèces végétales, expliquent aussi la densité du gui dans ces paysages (*Ramsauer et al., 2021*). Notre diamètre optimal de 8 km autour des placettes pour les populations de pin sensibles au gui est cohérent avec le diamètre minimal (3km) estimé pour expliquer le lien avec ces populations d'oiseaux.

L'effet néfaste de la processionnaire sur la défoliation du pin sylvestre sur est lié de manière directe et rapide à sa consommation d'aiguilles, et indirectement et à plus long terme via une réduction de la quantité de carbone absorbé par l'arbre. Comme dans toutes les autres régions où la processionnaire a été étudiée précédemment (par ex. *Robinet et al. 2007*), sa répartition et sa densité se sont montrées fortement corrélées au climat, favorisées en particulier par l'absence de grand froid en hiver (ces froids tuent les chenilles dans leur nid) et des températures douces d'octobre à mars qui permettent aux chenilles de sortir des nids pour se nourrir). Ceci explique l'augmentation des populations de processionnaire sur notre zone d'étude : des records de nombre de nids et de niveaux de défoliation ont été atteints entre 2015 et 2016, avec des versants entiers presque entièrement défoliés. Ces pullulations de processionnaire, qui se produisent tous les 7 à 8 ans, réduisent la croissance en diamètre des peuplements durant 1 à 3 ans, jusqu'à 80% pour les attaques majeures, et une perte de -7% à -27% en moyenne sur 40 ans selon l'intensité des attaques (*Marty et al. 2018*). De telles pertes se traduisent forcément par un affaiblissement, et donc par une défoliation durable. Il semble que l'intensité des attaques soit relativement constante à chaque cycle sur les sites sur une longue période, sans doute en rapport avec les conditions plus ou moins favorables à la processionnaire dans ces sites et dans leur environnement. Elles dépendent notamment de la densité dans le paysage des pins que la processionnaire affectionne (indice PPI, cf. fig. 5 et 6), car ses papillons femelles parcourent entre 1 et 6 km, exceptionnellement jusqu'à 10km, ce qui est cohérent avec le rayon optimal de 6 km trouvé pour cet indice.

Le tempérament héliophile du gui et de la processionnaire explique aussi pourquoi ils sont plus abondants dans les peuplements ouverts, sur les versants sud et à topographie défavorable (haut de pente, zone convexe) favorisant l'ensoleillement, et sur les mauvais sols (cf. fig. 4 à 6). Dans un cercle vicieux, sols et topographies défavorables, à faible bilan hydrique, et encore plus dans les zones les plus chaudes, rendent les peuplements de pin sylvestre plus clairs donc les houppiers plus favorables au gui et à la processionnaire. Lesquels en accentuant le dépérissement, notamment lors de la sécheresse pluriannuelle de 2003 à 2007 (Thabeet, 2008), ont encore favorisé l'ouverture des peuplements et donc les deux parasites. Par ailleurs, Guada et al. (2016) montrent, en Espagne, que la croissance des pins sylvestres les plus défoliés après une forte sécheresse est nettement moins résiliente que celle des arbres moins défoliés, et les expose donc plus à une mortalité lors des prochains stress climatiques.

Indépendamment des conditions de milieu, les peuplements ayant les plus gros diamètres moyens étaient plus fortement défoliés. Il peut y avoir un rapport entre cette défoliation et l'âge des peuplements, les plus vieux pins sylvestres (ayant statistiquement un plus gros diamètre moyen) s'étant montré nettement moins résistants et moins résilients aux sécheresses répétées que les jeunes sur les 50 dernières années dans la zone d'étude (Vennetier 2023). Des gros diamètres dans les peuplements sont aussi le plus souvent liés à une faible densité, donc un bon ensoleillement des houppiers, favorable comme expliqué précédemment au gui et à la chenille.

Dans le sud-est de la France, le pin sylvestre qui était peu abondant jusqu'au 19^{ème} siècle n'a que progressivement colonisé les zones abandonnées par l'agriculture, comme le montre la répartition de ses classes d'âge (fig. 3). Sa présence et son ancienneté sont donc irrégulières dans les paysages (Médail, 2001), avec des zones de faible densité de peuplements, majoritairement jeunes. La diffusion spatiale du gui dans un nouveau paysage à partir d'un point d'introduction accélère progressivement avec le temps, proportionnellement à l'abondance de sa population (donc de ses graines), et de ses plantes hôtes (Shaw et al. 2020). Cela explique qu'il soit presque absent de certaines placettes situées dans conditions qui lui sont théoriquement favorables, mais à faible densité de pins, et avec des pins surtout jeunes (idem pour la processionnaire). A l'inverse, ces agents biotiques peuvent être présents dans des sites qui leur conviennent peu climatiquement, mais où ils sont implantés depuis longtemps. Ces placettes où les deux parasites sont en sur- ou sous-effectifs par rapports à la théorie, pour des raisons historiques, sont minoritaires. Mais elles réduisent la capacité prédictive des modèles, masquant ou limitant sans doute le poids du climat dans ces modèles, et accentuant celui des parasites. Elles confortent bien par contre l'effet significatif de l'indice de présence des pins (PPI).

4.2 Des facteurs climatiques importants mais cachés par les interactions

Considérés seuls, les facteurs climatiques n'expliquent qu'une part limitée de la variance dans nos modèles, et sont même absents du modèle de risque (P30). Pourtant, les zones les plus sèches et les plus chaudes de notre zone d'étude, et celles à basse altitude, montrent un déficit foliaire significativement supérieur aux zones plus fraîches et humides (fig. 4 et 5). Ce constat est logique alors que notre zone d'étude se situe près de la limite sud et chaude de l'aire du pin sylvestre. Elle confirme sa sensibilité à la sécheresse et aux canicules, observée dans de nombreux pays et dans cette même région depuis au moins 40 ans, et plus précisément sa dépendance au bilan hydrique (P-ETP) durant toute l'année (saison de croissance et hiver). Nos variables climatiques ont été calculées sur la période 1981-2010, ces décennies étant marquées par des taux élevés de mortalité dans le sud-est de la France (Lieutier et al., 1988; Sardin, 1997, Thabeet 2008). Comme expliqué précédemment, les interactions entre variables climatiques, facteurs biotiques, géographiques et historiques, et la forte variabilité des âges des arbres dans les placettes, ont certainement caché en partie dans nos calculs le rôle important du climat.

4.3 Facteurs stationnels: sol et topographie modulent le bilan hydrique

Nos analyses soulignent le rôle clé, pour le pin sylvestre, du bilan hydrique estimé à partir de données précises de topographie à différentes échelles et d'une étude détaillée du sol. L'indice topoédaphique (TEI) développé pour la région méditerranéenne (Vennetier et al. 2008, 2018) a un effet significatif et un poids important dans tous les modèles. Il confirme donc son intérêt en tant qu'indicateur synthétique du bilan hydrique local, relevé essentiellement sur le terrain ou sur cartes, complétant les données climatiques et géographiques à plus large échelle. Il demanderait cependant à être recalibré dans d'autres régions, où l'importance relative de certaines variables pourrait être modifiée (poids relatif du climat et des conditions locales, types de sols non-présents en région méditerranéenne). Les indices topographiques calculés sur SIG à une échelle de 100 à 1500 m (TPI 100 et TPI 1500) se sont en complément montrés utiles dans certains modèles, illustrant l'importance de la circulation de l'eau dans le paysage, à toutes les échelles, pour le bilan hydrique local.

4.4 Comparaison des modèles de défoliation

Le modèle de défoliation calculé à l'échelle des arbres individuels (Défol) est moins performant que celui qui évalue la défoliation moyenne des peuplements (X50), leurs coefficients de détermination (r^2) étant respectivement de 0,38 et 0,65 (pour un maximum de 1). C'est en partie dû à la forte variabilité au sein d'une même placette des taux de défoliation des arbres, des âges et de la structure du peuplement (*fig. 3c*) mais aussi parfois du sol et sous-sol, ce qui est fréquent dans les zones montagneuses chahutées et en particulier dans les zones calcaires, dominantes dans notre zone d'étude.

Les modèles à l'échelle du peuplement, que ce soit le pourcentage d'individus ayant plus de 50% de défoliation (X50) ou le modèle de risque (P30), sont donc à privilégier, avec une bonne qualité prédictive, pour les analyses opérationnelles. Le modèle arbre donne des informations complémentaires intéressantes et importantes sur les caractéristiques significatives des arbres et des peuplements, qui peuvent être valorisées dans les peuplements et stations homogènes, dans les zones où les facteurs biotiques ont moins de poids et plus généralement dans l'analyse des causes de dépérissement.

Le modèle de risque s'avère donc pertinent (*fig. 7*) comme outil opérationnel utilisable sur le terrain, ce qui était son objectif. Même s'il a tendance à être légèrement pessimiste, il est intéressant pour l'aide à la décision. D'autant que l'accélération du changement climatique, les sécheresses répétées et les records de chaleurs battus régulièrement depuis la prise des données ayant servi à l'étude, obligent à prendre une marge de sécurité, qu'il offre de fait.

5. Conclusion

Cette étude confirme que le dépérissement des arbres, traduit ici par le niveau de déficit foliaire, est un phénomène complexe qui dépend d'un grand nombre de paramètres biotiques et abiotiques de leur environnement. Ces paramètres jouent à des échelles spatiales très variées, allant de l'environnement immédiat des arbres (quelques mètres), à celles des peuplements (quelques dizaines à centaines de mètres), des formes du relief (150 à 1500m), et du paysage (plusieurs kilomètres). Les échelles temporelles sont aussi variées, avec d'un côté les effets à court terme des sécheresses, des canicules et des attaques de processionnaire, et de l'autre leurs effets différés ou cumulés jusqu'à plusieurs dizaines d'années (effets de résistance et résilience de la croissance, ou amplification progressive des effets du gui). On voit aussi le rôle essentiel à moyen et long terme de l'évolution du climat, et de l'histoire des peuplements à l'échelle des paysages sur plus d'un siècle.

Si la gestion des peuplements n'a pas été abordée ici, puisque la plupart des sites étudiés n'étaient pas gérés, on sait qu'elle a aussi une grande importance, notamment par le contrôle de la densité des peuplements, de leur renouvellement donc de leur âge et de la taille des arbres, des mélanges d'espèces, de l'irrégularité de leur structure, etc. Le modèle arbre (Défol) montre que ces caractéristiques des arbres et peuplements ont leur importance, même si leur rôle est en partie caché dans notre échantillon par le choix aléatoire des placettes, ayant conduit à leur forte hétérogénéité interne. Il convient de les prendre en compte dans le traitement sylvicole adaptatifs au changement climatique. De très nombreux travaux conduits dans divers écosystèmes forestiers démontrent que les peuplements éclaircis résistent mieux aux stress hydriques et thermiques, sont plus résilients et de ce fait sont moins sensibles aux parasites et maladies. Par ailleurs, bien que l'âge ne soit pas toujours un facteur significatif, les vieux peuplements subissent majoritairement une plus forte mortalité que les jeunes lors de forts stress climatiques ou d'attaques de pathogènes dans des conditions similaires de milieu. C'est particulièrement le cas du pin sylvestre dans le sud-est de la France (Marty et al. 2018). Si les houppiers bien éclairés et volumineux des peuplements éclaircis sont susceptibles d'être favorables au gui et à la chenille, la densité de ces houppiers, peu défoliés, a deux effets bénéfiques : éviter le développement du gui dans ses parties basses, privées de lumière, et limiter le risque d'une défoliation totale par la processionnaire. On a vu que c'est dans un cercle vicieux que l'affaiblissement/défoliation de l'arbre et les effets néfastes des parasites s'amplifiaient mutuellement. Des arbres jeunes et

vigoureux sont plus à même d'échapper à cette spirale de dépérissement. D'autant que dans les peuplements gérés, les éclaircies peuvent cibler préférentiellement et précocement les arbres les plus gütés, au bénéfice de tous les peuplements des pins sensibles au gui dans un vaste périmètre (moins de graines de gui à disséminer)

Notre approche de modélisation du risque a été conçue pour être améliorée continuellement : chaque observation sur le terrain par des gestionnaires, scientifiques ou bureaux d'étude peut être ajoutée à la base de données. Le modèle peut ensuite être facilement recalculé et enrichi, adapté à de nouveaux milieux ou amélioré dans les milieux déjà connus, ou entièrement recalibré pour une autre région ou des conditions très différentes (par exemple, pour le pin sylvestre, là où le gui et la processionnaire sont absents ou peu présents).

La démarche présentée dans cet article pour le pin sylvestre continuera à servir de base pour modéliser le dépérissement de la plupart des essences des forêts françaises dans différentes régions. Elle aboutit à une application (www.cnfp.fr/bioclimsol) disponible sur tablettes format android qui est en constante amélioration. Elle répond à une demande pressante des gestionnaires forestiers confrontés aux dépérissements qui se multiplient dans toutes les forêts françaises.

6. remerciements

Ce travail a bénéficié de financements de la région Provence-Alpes-Côtes-d'Azur et du RMT AForce, et de l'aide technique du département Santé des Forêts. Le projet technique et le travail de terrain ont été coordonnés par le Centre Régional de la Propriété Forestière de la région PACA. Les auteurs remercient Manon Poncet, Hippolyte Perry et Alexandre Jourdan pour leur contribution importante aux travaux de terrain et à l'analyse des données.

7. Bibliographie

AIR (Association pour l'innovation et la recherche au service du climat) - 2016, Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Les cahiers du GREC-PACA, 44 pages. ISBN : 9782956006015.

Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., Cobb, N. (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.

Bador, M., Terray, L., Boé, J., Somot, S., Alias, A., Gibelin, A.-L. and Dubuisson, B., 2017. Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate. *Environmental Research Letters*, 12(7): 074025.

Bénichou, P., Lebreton, O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La météorologie* 7è série, 23-34

DSF - 2020a. Lettre du DSF : situation sanitaire des forêts à mi-année 2020. 8 pages. <https://agriculture.gouv.fr/la-lettre-du-dsf-situation-sanitaire-des-forets-mi-annee-2020>

[DSF 2020b. L'état sanitaire du pin sylvestre se dégrade face aux sécheresses successives. http://www.ofme.org/documents/Sante/DSF-info-202004-Deperissement_Pin_sylvestre.pdf](http://www.ofme.org/documents/Sante/DSF-info-202004-Deperissement_Pin_sylvestre.pdf)

DSF - 2022.a. Réseau systématique de suivi des dommages forestiers, campagne 2021, rapport 10 p. <https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets>

DSF – 2022.b. Crise scolytes sur épicéas. Quel est le bilan, fin 2021 ? Rapport, 6 pages <https://agriculture.gouv.fr/crise-scolytes-sur-epiceas-quel-est-le-bilan-fin-2021>

DSF - 2023 Indicateurs de santé des forêts (1989-2022), Rapport 3p. <https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets>

Girard, F., Vennetier, M., Guibal, F., Corona, C., Ouarmim, S., Herrero, A., 2012. *Pinus halepensis* Mill. crown development and fruiting declined with repeated drought in Mediterranean France. *Eur. J. For. Res.* 131, 919-931.

- Goudet, M., Saintonge, F.-X., Nageleisen, L.-M., 2018. Quantifier l'état de santé de la forêt, méthode simplifiée d'évaluation. *Dép. Santé For.* 1–6.
- Guada, G., Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R., Navarro Cerrillo, R. M., 2016. Limited Growth Recovery after Drought-Induced Forest Dieback in Very Defoliated Trees of Two Pine Species. *Frontiers in plant science.* 7: 418.
- Huc, R., 2011. Les réponses des arbres aux contraintes climatiques: aspects écophysologiques. *Forêt méditerranéenne* 32(2): 167-172.
- IGN - 2021. L'IF, Synthèse périodique de l'inventaire forestier national, N° 47, Novembre 2021
- IGN - 2022. Inventaire Forestier National: Mémento 2022. 35 pages
- Korboulewsky, N., Balandier, P., Dumas, Y. Gosselin, M., Mârell, A., Perot, T., 2021. "Quels intérêts et limites du mélange d'essences face aux changements globaux ? Les apports du dispositif OPTMix." *RenDez-Vous Techniques(71-72):* 51-57
- Lemaire J., Bec R., Peyrin, Jourde M. Havet N, Rosa J., Pillon S., Cano B., Becquey J., Saintonge F.X., 2022a. Bien comprendre l'outil de vigilance BioClimSol pour réaliser un diagnostic de qualité en forêt dans un contexte de dérèglement climatique, *Forêt Entreprise* 264, p.17-35
- Lemaire, J., Vennetier M., Prévosto B., Cailleret M., 2022b. "Interactive effects of abiotic factors and biotic agents on Scots pine dieback: A multivariate modeling approach in southeast France." *Forest Ecology and Management* 526: 120543.
- Lieutier, F., Faure, T., Garcia, J., 1988. Les attaques de scolytes et le dépérissement du pin sylvestre dans la région PACA. *RFF XL – 3 - 1988. Rev. For. Fr. XL, 224–232.*
- Marty, P., Vennetier M., Lemaire J., Poncet M., Perry H., 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.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Berger, S., Caud, N., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. IPCC, 2021 : Summary for Policymakers - 2021. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. ed.
- Médail, F., 2001. Biogéographie, écologie et valeur patrimoniale des forêts de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en région méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne* XXII, 5–22
- Müller, E., Stierlin, H.R., 1990. Sanasilva Tree crown photos. Sanasilva. ed, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf.
- Pauly, H., Belrose, V., 2005. La santé des forêts françaises: actualités de l'année 2004 - Sécheresse et canicule de l'été 2003: observation en 2004 des conséquences sur les peuplements forestiers adultes. *Rapp. Ministère L'Agriculture L'Alimentation Pêche Rural. Dép. Santé For. Paris* P 11
- Piedallu, C., Gégout, J.C., 2007. Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. *Ann. Sci. For.* 64, 899–909
- Quintana-Seguí, P., Moigne, P.L., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47, 92–107.
- Ramsauer, J., Brotons, L., Herrando, S., Morán-Ordóñez, A., 2022. A multi-scale landscape approach to understand dispersal of the mistletoe by birds in Mediterranean pine forests. *Landscape Ecology*, 37(1) 511-528.
- Ripert C, Vennetier M., 2002. Evaluation des potentialités forestières en zone méditerranéenne. Guide technique du forestier méditerranéen français. Chap. 2. Cemagref édition, 61p.
- Robinet, C., Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., Roques, A., 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 16, 460–471

- Robinet, C., Rousselet, J., Roques, A., 2014b. Potential spread of the pine processionary moth in France: preliminary results from a simulation model and future challenges. *Ann. For. Sci.* 71, 149–160
- RStudio Team, 2021. RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
- Sabatier S., Caraglio Y. & Drenou C., 2013. Guide pratique pour l'observation des indicateurs architecturaux de la réponse des arbres aux modifications climatiques. 115 pages.
- Sardin, T., 1997. La sylviculture des boisements de protection, la problématique de leur renouvellement. *For. Méditerranéenne* XVIII, 232–237
- Shaw, D. C., Lee C. A. 2020. "Expansion of the invasive European mistletoe in California, USA." *Botany* 98(9): 517-524.
- Skre, O., 1979. The regional distribution of vascular plants in Scandinavia with requirements for high summer temperatures. *Nor. J. Bot.* 295–318.
- 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 (These de doctorat). Aix-Marseille 3
- Thabeet, A., Venetier, M., Gadbin-Henry, C., Denelle, N., Roux, M., Caraglio, Y., Vila, B., 2009. Response of *Pinus sylvestris* L. to recent climatic events in the French Mediterranean region. *Trees* 23, 843–853.
- Turc, L., 1955. Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques* 6:5
- Venetier M., Girard F., Taugourdeau O., Cailleret M., Caraglio Y., Sabatier S. A., Ouarmim S., Didier C., Thabeet A., 2013. Climate change impact on tree architectural development and leaf area. In Singh B.R. (ed) *Climate change - Realities, Impacts Over Ice Cap, Sea Level and Risks*, InTech, Rijeka, P103-126 DOI: 10.5772/51510, ISBN 978-953-51-0934-1
- Venetier, M., Ripert, C., Maille, E., Blanc, L., Torre, F., Roche, P., Tatoni, T., Brun, J.J., 2008. A new bioclimatic model calibrated with flora for Mediterranean forested areas. *Ann. For. Sci.* 65, 12
- Venetier, M., Ripert, C., Rathgeber, C., 2018. Autecology and growth of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.): A comprehensive study in France. *For. Ecol. Manag.* 413, 32–47.
- Venetier M., 2023. Les forêts méditerranéennes face au changement climatique. Quelles leçons pour celles de la Sainte Baume, *Forêt Méditerranéenne*, 44 (2) 93-108.

8. Annexes

Annexe 1: sélection des données climatiques

Les données climatiques ont été obtenues en associant plusieurs sources. Les moyennes mensuelles des pluies et des températures maximales et minimales pour la période 1981-2010 sont issues du modèle AUREHLY de Météo-France. Ce modèle prend en compte les effets d'altitude, d'exposition et de topographie (Bénichou and Lebreton, 1987), avec une précision au kilomètre. Mais il ne procure pas les valeurs extrêmes des températures minimales absolues, qui sont essentielles pour expliquer la survie des chenilles de la processionnaire dans leurs nids en hiver, et contrôlent donc leurs populations. Ces extrêmes viennent du modèle SAFRAN (Quintana-Seguí et al., 2008), qui a cependant une moins bonne précision spatiale (maille de 8km). L'énergie solaire reçue au sol (moyenne mensuelle) a été estimée avec le modèle DIGITALIS (Piedallu and Gégout, 2007) qui prend en compte l'altitude, la latitude, l'orientation des versants et la pente, au pas de 50 m. L'évapotranspiration potentielle (ETP), une mesure de la demande en eau du sol par la végétation et l'évaporation, a été calculée avec la formule de Turc (1955).

L'indice de Skre (1979), développé pour évaluer la probabilité de présence du gui en Scandinavie, est basé sur la température minimale de janvier (T1) et la température maximale de juillet (T7), il a été testé avec succès dans d'autres pays :

$$\text{Skre} = 0.575 \times T7 + 0.101 \times T1 - 2.77$$

Annexe n°2: Régression PLS

Cette méthode d'analyse multivariée a l'avantage d'être peu sensible aux corrélations entre variables explicatives, de permettre l'utilisation de très nombreuses variables même avec un petit nombre d'observations, et de se prêter à des optimisations progressives (élimination pas à pas de variables) pour rechercher le meilleur modèle. Elle est intéressante en écologie où on peut avoir un très grand nombre de variables, notamment climatiques (pluies, températures moyenne, minimum, maximum et extrêmes, humidité, nébulosité, chacune de ces variables par mois, saisons, années ou groupes de 2 à 12 mois, sur plusieurs années) mais aussi pour le sol, la topographie, les caractéristiques des peuplements, etc. Elle a été utilisée avec succès, avec les mêmes variables explicatives et dans un contexte similaire, pour définir le modèle de bilan hydrique sur lequel s'appuie l'indice topoédaphique (TEI), la productivité et les relations climat croissance de nombreuses espèces locales (par ex. Vennetier et al. 2008, 2018). Une variante de la PLS (LogPLS) modélise les variables binaires (par exemple vrai/faux, ou 1/0) en minimisant les erreurs de prédiction de chacune des deux catégories en jeu. Ici il s'agit de vérifier le risque de dépérissement des peuplements (P30) : y a-t-il oui ou non au moins 30% d'arbres défoliés à 50% ou plus ?

Dans les deux variantes de la PLS, on calibre l'analyse (choix des composantes de l'analyse multivariée) et on vérifie ensuite la robustesse des modèles par des méthodes de rééchantillonnage aléatoire (bootstrap ou validation croisée): on recalcule avec ces méthodes les paramètres des modèles des centaines de fois sur des sélections aléatoires partielles de l'échantillon. Cela permet de s'assurer que les modèles ne dépendent pas d'une petite partie des placettes qui auraient des caractéristiques trop particulières, ou des valeurs extrêmes pour certaines variables, se traduisant par des coefficients de corrélation et l'importance de certaines variables artificiellement trop élevés ou trop faibles. On obtient aussi l'intervalle de confiance de l'ensemble des paramètres de l'analyse, ce qui facilite leur sélection et leur interprétation.