

## CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est celle la plus touchée en France par les changements liés à l'évolution du climat et par les dépérissements en forêt. Cette région a connu les plus fortes augmentations de température et les plus fortes diminutions de précipitations.

Le Pin sylvestre, fortement impacté par les sécheresses répétées des années 2000, y est l'essence principale en superficie (250 000 ha). L'étude de son dépérissement apparaît donc comme un enjeu prioritaire.

## CONTENU DU PROJET



Ce projet se scinde en quatre parties :

- Proposer une carte de vigilance climatique (cartographie de la sensibilité au changement climatique) pour le Pin Sylvestre à l'aide de l'outil BIOCLIMSOL (Fig. 1) ;
- Estimer les facteurs de compensation ou d'aggravation du climat (sol, topographie) grâce à l'indice de compensation du climat (ICC) qui, croisé à la carte de vigilance climatique, pourra permettre d'obtenir une carte de vigilance pédoclimatique ;
- Cerner l'impact du climat et de ses évolutions sur la croissance radiale du Pin Sylvestre. Cette action vise à améliorer la caractérisation du déterminisme du dépérissement du Pin sylvestre en lien avec sa croissance radiale en évaluant les parts des variables liées au climat, aux parasites et pathogènes, et aux conditions topographiques et édaphiques ;
- Proposer des recommandations sylvicoles en vue de limiter le risque de dépérissement.

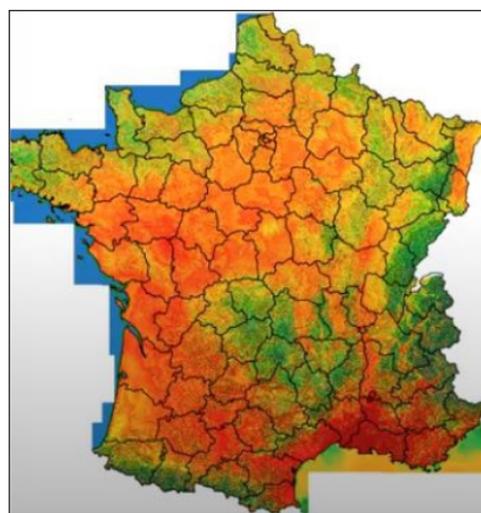
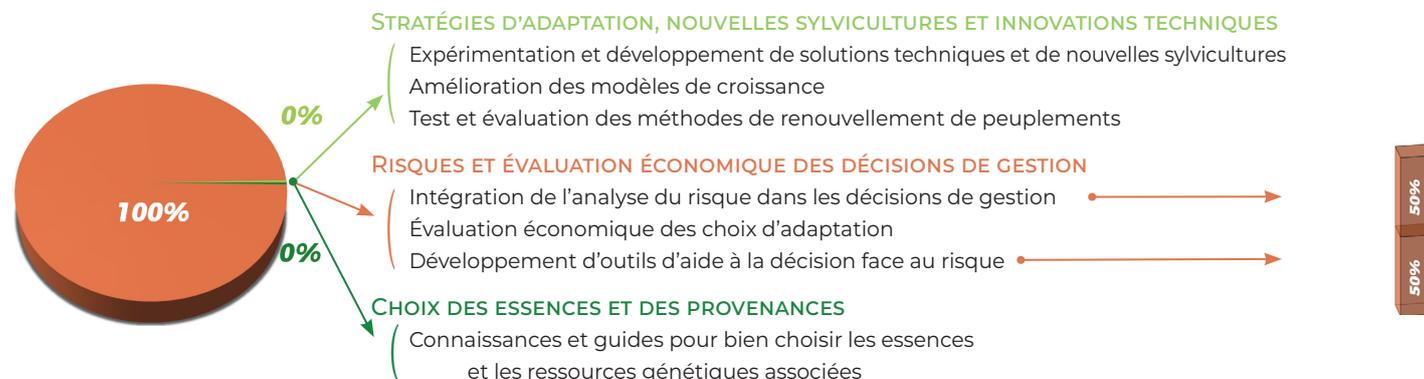


Figure 1 : Exemple d'une carte de vigilance climatique du Pin Sylvestre sous climat actuel à l'aide de l'outil BioClimSol, à l'échelle nationale.

## CONTRIBUTION DU PROJET AUX THÉMATIQUES D'AFORCE



## PARTENAIRES DU PROJET

## RÉCOLTE DE DONNÉES

### Récolte de données issues du terrain

Afin de déterminer les facteurs prépondérants du phénomène de dépérissement, des relevés de terrains sur 90 placettes temporaires réparties dans la région ont été réalisés. Les critères de stratification<sup>1</sup> sont l'altitude, les indices IKR<sup>2</sup> (climat lumineux lié à la pente et à l'exposition) et TPI (lié à la topographie).

Les données suivantes ont été récoltées :

- État sanitaire (protocole DEFIFOL : défoliation du houppier, nombre de nids de chenilles processionnaires, ...)
- Caractéristiques dendrométriques (hauteur et âge moyen des arbres concernés, diamètre à 1m.30 (DBH), surface terrière, ...)
- Critères topographiques (orientation de la placette, la pente, topographie transversale et longitudinale, ...)
- Critères édaphiques (pH de l'eau du sol à 20 cm. de profondeur, texture des horizons, ...).

L'indice topo-édaphique (IRSTEA) reflétant le bilan hydrique et la fertilité du sol a été déterminé<sup>3</sup>.

Sur un sous-échantillon de 30 placettes, 900 carottes ont été réalisées.

### Récolte de données SIG

Les données climatiques sont issues de Météo-France pour la pluviométrie et la température (modèles AURELHY et SAFRAN) et d'AgroParisTech pour le rayonnement (DIGITALIS) ; elles se présentent sous la forme de temporalités et de maillages différents. Un modèle composite « SAFRAUTALIS » présentant une résolution fine au pas de 50m. et une temporalité mensuelle a été créée.

Des descentes d'échelles de données ont dû être réalisées.

L'altitude est une donnée obtenue à partir du modèle numérique de terrain de l'IGN au pas de 25m. et a permis le calcul des indices TPI et IKR.

## ANALYSE DE DONNÉES

Les variables sanitaires ont été moyennées à l'échelle de la placette et une catégorie (liée aux taux moyens de défoliation) a été attribuée à chaque placette. Un premier traitement a été conduit à l'échelle de la placette, puis à l'échelle de l'arbre pour les données dendroécologiques et sanitaires. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide des logiciels R, Statgraphics et Tanagra. Les indices de risque de dépérissement du Pin sylvestre et de présence du gui ont été réalisés par la méthode de régression PLS (partial least square). La qualité de prédiction des modèles a été testée avec des techniques d'arbres de décision, de régression logistique et par la méthode PLS. La robustesse de prédiction a été testée par validation et bootstrap.

## RÉSULTATS

### État sanitaire

Le taux de défoliation moyen (Fig. 2) sur les placettes est de 48 % (même au-delà de 1200 m. > 40 %). Il est plus élevé en versant chaud, à basse altitude et en haut de versant. 79 % des placettes présentent du gui (dont 37 % avec un taux d'occupation moyen des houppiers > à 10 %). 2/3 des placettes sont concernées par la chenille processionnaire avec en moyenne un à deux nids de chenilles par arbre. Une corrélation positive entre taux de mortalité et taux de défoliation a pu être démontrée. Des corrélations positives entre taux d'infestation du gui et taux de défoliation des houppiers ainsi qu'entre taux de mortalité et taux de présence de gui ont pu être mises en évidence.

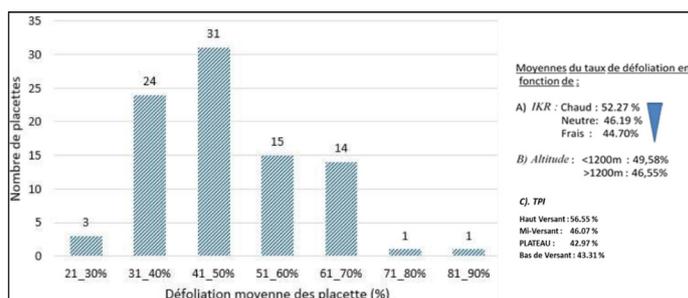


Figure 2 : Effectifs des placettes par taux de défoliation moyen de leurs houppiers (en %) et moyennes de défoliation des placettes en fonction des critères de stratification.

### Modèle multifactoriel explicatif du dépérissement et Modèle GUI

Le modèle de dépérissement (taux\_depe50) présente une très bonne qualité de prédiction.

Les 2 variables prépondérantes responsables d'une forte défoliation sont la présence de gui et de nids de chenilles processionnaires. De plus, lorsque l'indice topo-édaphique est faible, et donc le bilan en eau et la fertilité de la station sont mauvais, les dépérissements sont importants. Enfin, plus la surface terrière est faible plus le risque de dépérissement est important.

Le modèle sur les facteurs influant sur la présence de gui présente une qualité de prédiction acceptable.

La présence de gui est caractérisée par un microclimat chaud et sec, mais de faibles températures de décembre sont corrélées avec une forte présence de gui. Ce dernier résultat pourrait refléter une limite de présence du gui, au sud de la région d'échantillonnage.

## Dendroécologie

**Croissance et station** : Les arbres des bonnes stations ont plus souffert que ceux des mauvaises stations, et les pertes de croissance sont plus notables à basse altitude. Les éclaircies sont très utiles sur les bonnes stations et les stations intermédiaires.

**Croissance et chenille processionnaire** : Les attaques des chenilles sont récurrentes sur certains sites. Plus les accidents climatiques sont fréquents, plus la probabilité d'addition des phénomènes est forte.

**Croissance et gui** : Le gui entraîne une perte de croissance après chaque accident climatique, et ce pendant plusieurs années, d'autant plus longue et forte que le pourcentage de gui est élevé. Au-delà de 40 ans d'infestation, les arbres ne montrent plus aucune résilience.

**Croissance et âge** : Au-delà de 90-100 ans, les arbres sont bien moins résilients.

## OUTILS ET PRÉCONISATIONS

### Indice Climat Sol (ICS) et carte de vigilance climatique (Fig. 3)

$$\text{ICS} = 32.84 - 2.18 \text{ GUIMOY terrain} + 1.12 \text{ ITE} - 1.12 \text{ GUIMOY modele}$$

Avec GUIMOY : le % de volume du houppier occupé par du GUI et ITE : l'indice topo-édaphique.

Cet indice est compris entre -5 et 5. Plus l'indice est élevé, plus la station est favorable et le risque de dépérissement est faible.

### Clef d'aide et préconisations (Fig. 4)

#### CAS 1 : Cas de fort dépérissement du pin sylvestre.

Il faut tendre vers une transformation progressive du peuplement. Si au moins 100 tiges/ha ont un avenir possible, il faut réaliser des éclaircies à leur profit avant d'envisager la transformation.

**Interventions recommandées** : Des éclaircies peuvent favoriser l'apparition de nouvelles essences, en ciblant les arbres les plus gûités à éliminer. L'introduction d'essences par reboisement en plein ou par enrichissement permettra une évolution plus rapide. Pour les mauvaises stations, on s'interrogera sur la pertinence d'investir en raison des faibles productions.

**CAS 2 : Situations intermédiaires**, avec des signes notables de dépérissement, mais avec une résilience possible. Il s'agit aussi des cas sans signes de dépérissement, mais à risque du point de vue climatique. La gestion du pin sylvestre doit alors viser l'augmentation de sa résistance au stress hydrique (*éclaircies et mise en régénération des arbres âgés moins résistants*) et le maintien et l'arrivée d'autres essences.

**Interventions recommandées** : Renouvellement des arbres de plus de 80-100 ans, éclaircies en traitement régulier ou irrégulier fréquentes et orientés, élimination prioritaire des arbres gûités, maintien des autres essences en place et « d'arbres parasols » et coupes permettant l'arrivée progressive d'une régénération de Pin sylvestre ainsi que d'autres essences.

**Cas 3 : Il s'agit des cas les plus favorables** ou la vigilance climatique est modérée. Il est envisageable de poursuivre avec le Pin sylvestre en menant une gestion classique, mais il est toutefois conseillé d'être vigilant avec le risque accru de sécheresse.

**Interventions recommandées** : Maintenir ces peuplements à des densités modérées, et une gestion en peuplement irrégulier peut aussi permettre d'augmenter la résilience.

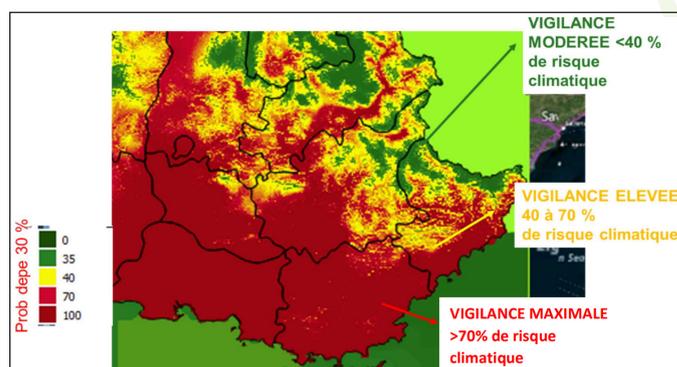


Figure 3 : Carte de vigilance climatique BIOCLIMSOL définissant le risque de dépérissement du pin sylvestre (le dépérissement est défini ici par la présence de plus de 30 % de tiges avec plus de 50 % de défoliation).  
« Prob depe 30% » correspond à la probabilité d'avoir du dépérissement à ce seuil de 30%.

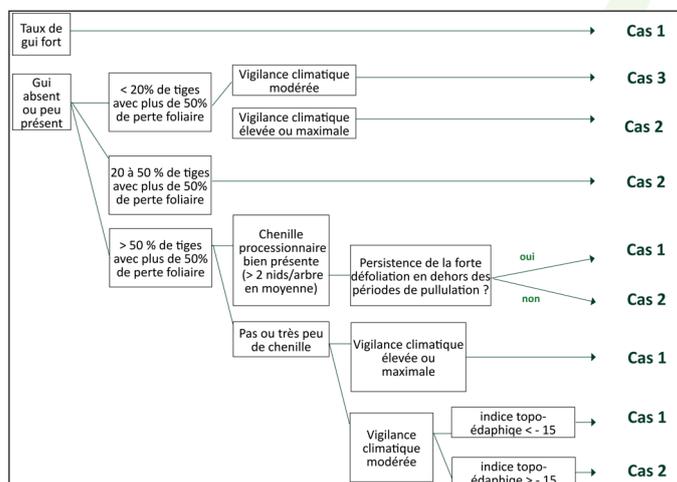


Figure 4 : Clef d'aide à la décision du niveau de risque.

## LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Le pin sylvestre est impacté par des défoliations importantes (taux de défoliation moyen de 48 %) liées principalement à deux facteurs biotiques : la présence de gui et de nids de chenilles processionnaires.

La présence de gui et son taux de colonisation sont liés à des facteurs climatiques.

Le nombre de nids de chenilles processionnaires quant à lui est conjoncturel.

Les autres paramètres rentrant en ligne de compte sont de type stationnel, avec en premier lieu l'indice topo-édaphique. Contrairement à l'indice topo-édaphique, le gui est cartographiable car lié à des données climatiques.

Le pin sylvestre est situé principalement dans un contexte où la probabilité de dépérissement est comprise entre 40 % et 70 %.

## PUBLIC CIBLE ET FINALITÉ DU PROJET

Difficulté d'appropriation :  FAIBLE  MOYENNE  FORTE Absence de cette finalité pour ce public :

PUBLIC CIBLE \ FINALITÉ	Gestion	Recherche et développement	Pédagogie
	Outils et recommandations	Outils et création de contenu	Acquisition des connaissances
Propriétaires forestiers	●	○	●
Personnel forestier technique	●	○	●
Acteurs de la recherche et du développement	○	●	●
Étudiants de l'enseignement supérieur	○	●	●
Étudiants de l'enseignement technique	●	○	●

Les processus de modélisation peuvent bénéficier à l'ensemble de la communauté de recherche et développement (ainsi qu'aux étudiants de l'enseignement supérieur) tandis que la carte de vigilance climatique et les préconisations sylvicoles ont majoritairement une visée de gestion (et dans une moindre mesure pédagogique) à destination des propriétaires et acteurs de terrain.

## CASTING

La coordinatrice du projet est Mme Pauline Marty (CRPF Provenances-Alpes-Côte-d'Azur).

Ce projet a été mené avec la participation de M. Jean Lemaire (CNPFF-IDF) ainsi que de M. Michel Vennetier (IRSTEA).

Ce projet a été piloté par le CRPF PACA et mené en partenariat avec l'IRSTEA et l'IDF.

Des réunions de comité technique associèrent le DSF, l'ONF, le RMT, l'INRA, la DRAAF, la DREAL, la Région PACA, l'association Forêt Méditerranéenne et les gestionnaires forestiers. L'ensemble des acteurs forestiers de la région Provenances-Alpes-Côte-d'Azur ont été conviés au comité de pilotage final.

## POUR OBTENIR PLUS D'INFORMATIONS

Plus d'informations sur les forêts méditerranéennes et alpines face aux changements climatiques en PACA sont disponibles sur la [page projet SYLFORCLIM](#) du RMT AFORCE et sur le [site du CRPF de Provence-Alpes-Côte-d'Azur](#).

Pour plus d'information sur BioClimSol, rendez-vous sur le [site du CNPF](#) et sur [la page outils sylvoclimatiques](#) du RMT AFORCE.

<sup>1</sup> ONF. (2016). Observatoire du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes - Bilan de la campagne d'observations de 2016, 18p.

<sup>1</sup> 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. Université Paul-Cézanne Aix-Marseille III, 282p.

<sup>2</sup> Becker, M. (1979). Indices de climat lumineux combinant pente et exposition. Bulletin D'écologie, 10(2), p.125-137.

<sup>3</sup> Ripert, C., & Vennetier, M. (2002). Guide technique du forestier méditerranéen français chapitre 2bis : Évaluation des potentialités forestières. (Cemagref A), 60p.

## FINANCEURS DU PROJET

