



HAL
open science

Forêts méditerranéennes et alpines face aux changements climatiques : le cas du pin sylvestre en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

P. Marty, M. Vennetier, J. Lemaire, M. Poncet, H. Perri, A. Jourdan

► To cite this version:

P. Marty, M. Vennetier, J. Lemaire, M. Poncet, H. Perri, et al.. Forêts méditerranéennes et alpines face aux changements climatiques : le cas du pin sylvestre en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. [Rapport de recherche] irstea. 2018, pp.83. hal-02607574

HAL Id: hal-02607574

<https://hal.inrae.fr/hal-02607574>

Submitted on 16 May 2020

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

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

AFORCE
RMT Adaptation des forêts
au changement climatique



SYLFORCLIM – RAPPORT FINAL

Forêts méditerranéennes et alpines face aux changements climatiques



Gilles Bossuet - CRPF PACA © CNPF



Centre Régional de la Propriété Forestière
de Provence-Alpes-Côte d'Azur

7, impasse Ricard Digne

13 004 Marseille

04 95 04 59 04 – paca@crpf.fr

www.ofme.org/crpf

RESUME

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est la région de France la plus touchée par le changement climatique. Le pin sylvestre est la première essence de la région en termes de superficie (250 000ha) et de volume sur pied. Elle est fortement impactée par les sécheresses à répétition depuis les années 2000, et par la multiplication et l'intensification des attaques de parasites (Gui, chenille processionnaire). Les enjeux pour la filière bois sont donc forts sans compter les effets sur la biodiversité, la multifonctionnalité et le risque incendie qui sont accrus. Les objectifs réalisés dans ce projet sont :

1. Cartographier la sensibilité aux changements climatiques pour le pin sylvestre avec l'outil BIOCLIMSOL
2. Estimer les facteurs de compensation ou d'aggravation du climat (sol, topographie...)
3. Mieux cerner l'impact du climat et de ses évolutions sur la croissance radiale du pin sylvestre à court et long terme à partir d'une étude dendroécologique
4. évaluer l'état sanitaire actuel des peuplement sur toute la région,
5. Proposer des recommandations sylvicoles en vue de limiter le risque de dépérissement et soutenir la productivité des peuplements.

Des relevés de terrain ont été réalisés sur 90 placettes. Les résultats mettent notamment en avant le fort taux de défoliation moyen du pin sylvestre (48%), un taux de mortalité élevé, et le rôle prépondérant du gui dans le dépérissement du pin sylvestre. La présence du gui est liée à des facteurs climatiques. La chenille processionnaire réduit significativement la productivité des peuplements dans les zones où elle sévit périodiquement. Les caractéristiques de la station, la densité et l'âge des peuplements jouent aussi un rôle significatif en interaction avec le climat.

In France, Provence-Alpes-Côte d'Azur region is the most affected by climate change. Scots pine (*Pinus sylvestris*) is the most widely distributed tree species in this region (250 000ha). Scots pine is strongly impacted by repeated droughts since 2000, and by the intensification of pest attacks, such as mistletoe and the processionary moth. The wood based industry is at risk, not to mention the effects on biodiversity, ecosystem services and fire risk. This project aimed to :

1. Design a practical tool (BIOCLIMSOL) and a map allowing forest managers and owners to assess easily the level of vulnerability of Scots pine to climate change;
2. Assess ecological conditions (soil, topography, orientation, elevation ...) that may compensate or aggravate climate impacts);
3. Understand the short and long term impact of climate change and interannual variability on the radial growth of *Pinus Sylvestris* from a dendroecological study;
4. Measure objectively the present health status of Scots pine at regional level through crown transparency, dead branches and needle size and color,
4. Propose silvicultural recommendations to limit the risk of decline and dieback and sustain forest productivity.

Field surveys use a network of 90 plots representative of Scots pine distribution area. The results highlight the high rate of defoliation of Scots pine at regional scale (48%) and the prominent role of mistletoe in this decline. The presence of mistletoe could be linked to climatic factors. The processionary moth reduces significantly Scots pine productivity were its attacks are recurrent. Site condition, stand density and tree age also play a significant role.

Ce projet est soutenu par le RMT AFORCE. Il bénéficie d'un co-financement du ministère de l'agriculture et de la forêt et de l'interprofession France-Bois Forêt. Il dispose par ailleurs d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).



SOMMAIRE

DESRIPTIF DU PROJET.....	5
ENJEUX ET OBJECTIFS	5
Contexte et enjeux	5
Objectifs.....	5
PARTENARIATS ET PILOTAGE.....	6
Réunions réalisées	6
ETAPES DU PROJET	6
Descriptif des actions réalisées	6
Actions non réalisées.....	7
Actions réalisées additionnelles	7
METHODE DE TRAVAIL	8
Plan d'échantillonnage des placettes.....	8
Critères de stratification de l'échantillonnage	9
Cas de rejet des placettes sur le terrain	9
Données relevées sur les placettes	10
Etat sanitaire des peuplements.....	10
Critères dendrométriques	11
Critères topographiques.....	11
Critères édaphiques.....	11
L'indice topo-édaphique.....	11
.....	12
Données dendroécologiques.....	12
Données issues du SIG.....	12
Données climatiques	12
Correction d'échelle des données climatiques.....	13
Données stationnelles et topographiques	14
Traitement des données.....	15
RESULTATS.....	16
Résultats issus d'autres études	16
Dépérissement du pin sylvestre à l'échelle de son aire de répartition	16
Constats de dépérissements dans la région PACA	16
Les facteurs de dépérissement identifiés dans la littérature	18
Résultats issus des données relevées sur l'état sanitaire	19



Caractérisation de l'état sanitaire des placettes	19
Détermination d'un modèle explicatif multifactoriel du dépérissement.....	23
Le modèle « gui ».....	25
Carte de vigilance climatique et indice climat-sol.....	27
Résultats issus des données dendroécologiques	32
Séries moyennes pour les cernes bruts et indicés	32
Décroissance naturelle des cernes avec l'âge	34
Croissance selon l'altitude.....	34
Croissance selon l'indice topo-édaphique.....	35
Croissance selon la topographie (le TPI).....	37
Croissance selon l'IKR	37
Croissance selon la surface terrière G	38
Croissance selon la présence de chenille processionnaire.....	39
Croissance selon la présence de gui	43
Croissance et classe d'âge	46
Croissance et évolution du climat	47
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	49
Résumé des résultats.....	49
Enquête sur les stratégies d'adaptation existantes	50
Mise en pratique des résultats	51
Eléments pour un diagnostic	51
Recommandations de gestion	52
Autre piste de mise en œuvre	54
Pistes pour poursuivre l'étude	55
BIBLIOGRAPHIE.....	56
ANNEXE 1 : Caractéristiques bioclimatiques de la région PACA.....	60
ANNEXE 2 : Autécologie du pin sylvestre.....	61
ANNEXE 3 : L'outil Bioclimsol.....	63
ANNEXE 4 : Personnes impliquées dans le projet.....	66
ANNEXE 5 : Comptes rendus de réunions	67
Annexe 6 : Fiche de relevés de terrain.....	73
Annexe 7 : Relevés de terrain	75
Annexe 8 : Caractéristiques des modèles climatiques	0
Annexe 9 : Variables utilisées dans les analyses statistiques.....	2
Annexe 10 : Projet d'outil utilisable sur le terrain.....	4

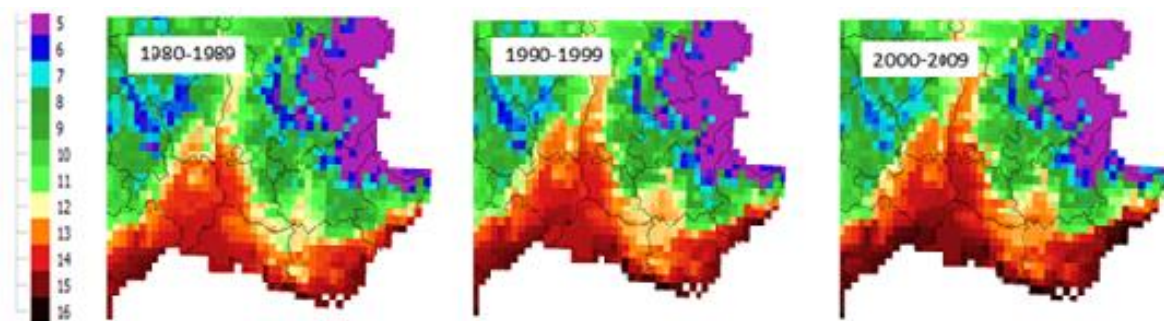
DESCRIPTIF DU PROJET

ENJEUX ET OBJECTIFS

Contexte et enjeux

L'étude par Météo-France de l'évolution du climat sur les 50 dernières années révèle que Provence-Alpes-Côte d'Azur est la région de France la plus touchée par ces changements. Elle a connu les plus fortes augmentations de température, les plus fortes diminutions de précipitations et de pluies efficaces. Quand l'augmentation moyenne des températures a été pour la France de 1,5 °C sur la période 1959-2009, pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur elle a été de 2°C (Gibelin A., Météo France, 2015).

5



Evolution des températures annuelles en région PACA de 1980 à nos jours par décennies (Source : IDF à partir des données Safran Météo France, résolution 8x8km)

Le contexte bioclimatique de la région PACA est détaillé en annexe 1. PACA est une des régions où le plus de dépérissement est enregistré ces dernières décennies (Goudet 2012).

Le pin sylvestre est la première essence forestière de la région en termes de superficie (250 000 ha). Il est situé dans les zones de transition entre climats méditerranéen et alpin (l'autécologie du pin sylvestre est détaillée en annexe 2). C'est une essence fortement impactée par les sécheresses à répétition des années 2000 (Thabeet A., 2008, Lelou D., 2010, Thauvin G. 2011). Les enjeux pour la filière bois (biomasse) sont donc forts sans compter les effets sur la biodiversité, la multifonctionnalité et le risque incendie qui serait accru.

Des territoires se sont déjà saisis de la question et l'ont inscrit comme enjeu prioritaire de leur politique forestière locale (cas par exemple du Parc Naturel Régional du Mont Ventoux). D'autre part, les propriétaires forestiers privés font d'ores et déjà part de leurs incertitudes, inquiétudes et questionnements concernant l'avenir de leur forêt et la conduite à adopter.

Objectifs

Les objectifs sont :

1. Évaluer les risques et cartographier la sensibilité aux changements climatiques pour le pin sylvestre avec l'outil BIOCLIMSOL. Cette étude s'inscrit dans le développement de l'outil Bioclimsol qui est présenté en annexe 3. Ce premier objectif vise à établir une carte de vigilance climatique sous format raster (pour SIG gratuit type Qgis) pour le pin sylvestre. Il s'agit aussi de proposer un indice de compensation du climat (ICC) permettant de prendre en compte les effets du sol, de l'exposition et de la topographie pouvant tamponner, ou à l'inverse accentuer, les effets du climat. Le croisement entre la carte de vigilance climatique et l'ICC permettra de proposer une carte de vigilance pédoclimatique.



2. Mieux cerner l'impact du climat et de ses évolutions sur la croissance radiale du pin sylvestre à partir d'une étude dendroécologique. Des modèles de croissance radiale seront établis en lien avec le climat et la station pour mesurer l'impact des à-coups climatiques sur la croissance radiale du pin sylvestre en PACA. Cette action vise à améliorer la caractérisation du déterminisme du dépérissement du Pin sylvestre en lien avec sa croissance radiale, en évaluant la part des variables liées au climat, celles liées au peuplement, aux parasites et pathogènes (chenille processionnaire, gui) et aux conditions topographiques et édaphiques des stations.

3. Proposer des recommandations sylvicoles en vue de limiter le risque de dépérissement de cette essence. Ces recommandations seront discutées avec les différents acteurs concernés.

PARTENARIATS ET PILOTAGE

Le projet est piloté par le CRPF PACA et mené en partenariat avec l'IRSTEA et l'IDF. Les différentes structures partenaires et les personnes impliquées sont présentées en annexe 4.

Réunions réalisées

Deux réunions de comité technique ont eu lieu les 3 Mars 2016 et 26 Avril 2017. Les partenaires membres du Comité Technique sont : le RMT Aforce, l'IRSTEA, l'IDF, l'ONF, l'INRA, la DRAAF, le DSF, la DREAL, la Région PACA, l'association Forêt Méditerranéenne et les gestionnaires forestiers (Avisilva, Alcina, Coopérative Provence Forêt). Un comité de pilotage auquel l'ensemble des acteurs forestiers de la région PACA ont été conviés a été organisé le 13 Mars 2018. Les résultats de l'étude ont été présentés lors de celui-ci. Un échange sur les recommandations de gestion a eu lieu.

Les comptes rendus sont présentés en annexe 5.

ETAPES DU PROJET

Descriptif des actions réalisées

Le projet s'articule en deux volets :

- Volet 1 : Évaluation des risques et cartographie de la sensibilité aux changements climatiques pour le pin sylvestre avec l'outil BIOCLIMSOL
- Volet 2 : Elaboration concertée de stratégies exploratoires d'adaptation de la gestion forestière

Récupération des données existantes (Volet 1)

Les données géolocalisées sur le dépérissement du pin sylvestre suivantes ont été récupérées:

- Données sur l'indice foliaire (NDVI calculé à partir des données satellitaires, données issues de la Thèse de Ali Thabeet) récupérées auprès de l'IRSTEA (118 000 points de 1995 à 2006) ;
- Données du DSF issues du réseau systématique de la région PACA (23 placettes avec du pin sylvestre suivies entre 1989 et 2015) et des signalements (672 depuis 1973) ;
- Données de l'observatoire départemental du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes, collectées par l'ONF. Placettes permanentes sur l'état sanitaire du pin sylvestre (299 arbres suivis avec le protocole DSF, sur une quinzaine de placettes). Carte des mortalités : cartographie des surfaces touchées sur l'ensemble du département : soit 12523 ha de pin sylvestre décrits en classe de mortalité.

Les apports de ces données sont présentés en partie « Résultats/Résultats issus d'autres études ».

Relevés de terrain (Volet 1)

Des relevés de terrain répartis sur 90 placettes ont eu lieu. Cette action est détaillée ci-après dans la partie « méthode de travail ».



✚ **Production d'une carte de vigilance climatique (Volet 1)**

La prise en compte du jeu de données lié au NDVI et des relevés de terrain a permis d'établir une carte de vigilance climatique. La méthode d'obtention de cette dernière est présentée dans la partie « Méthode de travail-Données climatiques et traitement SIG ». La carte est présentée dans la partie « Résultats ».

✚ **Intégration des indices de compensation du climat (Volet 1)**

Les indices de compensation du climat ont été intégrés grâce au SIG d'une part et au relevé de terrain d'autre part (voir partie « Méthode »).

✚ **Enquête sur les stratégies d'adaptation existantes (Volet 2)**

Une enquête auprès des propriétaires forestiers de la région PACA a été menée. Elle n'avait pas une visée statistique mais avait plutôt pour but de faire ressortir les différentes stratégies d'adaptation existantes et d'identifier des propriétaires intéressés par la démarche (voir partie « conclusions »).

✚ **Réflexion sur les limites et possibilités de transfert des résultats à d'autres régions. (Volet 1)**

Une réflexion sur l'extension de la carte à d'autres régions a été menée (voir partie « Conclusions »).

✚ **Concertation avec les gestionnaires sur les stratégies exploratoires d'adaptation (Volet 2)**

Une concertation avec les acteurs locaux (propriétaires, gestionnaires, territoires) a été menée lors du dernier comité de pilotage. Les préconisations de gestion sont présentées en partie « Conclusions ». Il était prématuré d'aller plus loin en terme de déclinaison des itinéraires de gestion à ce stade.

✚ **Comparaison des méthodologies IKS et BIOCLIMSOL sur la base de la carte de vigilance établie pour le pin sylvestre. (Volet 1)**

Actions non réalisées

✚ **Intégration des données du climat futur (Volet 1)**

Il était prévu de compiler les données climatiques futures du portail DRIAS METEOFRENCE pour cartographier les évolutions climatiques attendues, et ce en vue de produire l'évolution future des cartes de vigilance. Cette action n'a pas été réalisée car elle s'est avérée peu pertinente. En effet, une telle méthodologie a été appliquée dans un projet mené dans le Haut Languedoc. Il en a résulté que l'hypothèse de + 1°C pour faire évoluer les cartes de vigilance était à ce jour la plus pertinente, étant donné les limites des modèles climatiques en termes notamment de rayonnement.

✚ **Analyse technico-économique des stratégies d'adaptation existantes (Volet 2)**

Pour des raisons de temps disponible et de pertinence, et comme décidé en lien avec les financeurs, cette action n'a pas été réalisée. La priorité a été mise sur l'amélioration des résultats (voir notamment l'action additionnelle sur la dendroécologie réalisée par l'IRSTEA).

Actions réalisées additionnelles

✚ **Etude dendroécologique**

Un sous-échantillon de 30 placettes, représentatives des variations environnementales (altitude, exposition, pente, bilan hydrique local), a été choisi. Sur 15 arbres par placette, deux carottes par arbres ont été prélevées à la tarière de Pressler, soit 900 carottes. Après collage, ponçage et scannage de ces carottes, les largeurs de cernes ont été mesurées. Il a ainsi été possible d'établir l'évolution à long terme de la croissance des arbres, et leur réaction aux extrêmes climatiques, en fonction des conditions locales. La chronologie remonte sur 2 siècles (arbre le plus âgé = 199 ans).



Elle est fiable jusqu'à environ 150 ans, le nombre d'arbres plus âgés étant trop faible.

METHODE DE TRAVAIL

Dans un premier temps, la démarche adoptée consiste à déterminer les facteurs prépondérants dans le phénomène de dépérissement. Pour cela, les différents facteurs susceptibles de jouer un rôle (critères climatiques, édaphiques, topographiques, dendrométriques et biotiques) ont été évalués à partir de données issues de relevés de terrain d'une part et de données SIG d'autre part. Les relations entre dépérissement et facteurs ont été analysées.

Dans un second temps, afin de mieux cerner l'impact des années caractéristiques climatiquement qui ont engendré des fortes pertes de croissance voire des dépérissements, l'étude dendroécologique étudie les relations cernes/croissance à un pas annuel.

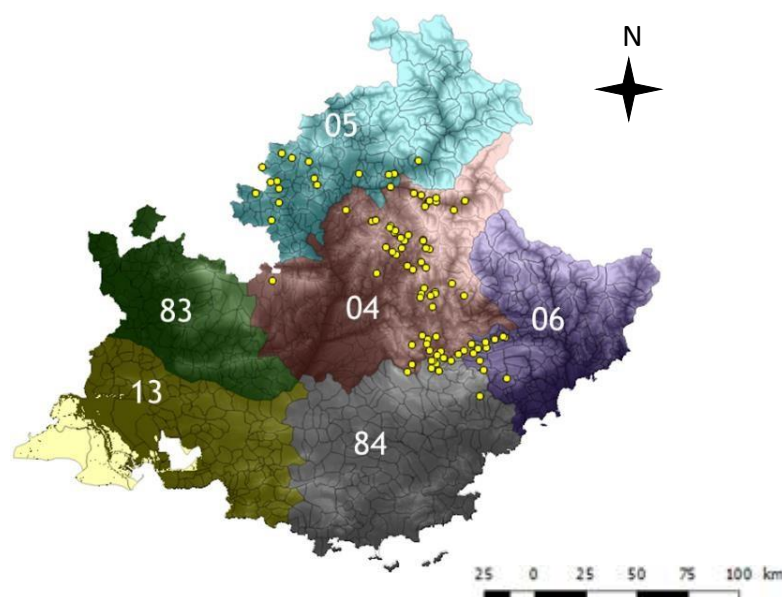
Pour relever les données qui ne pouvaient être obtenues que sur le terrain et non par une approche SIG (soit les données sanitaires, édaphiques, dendrométriques, biotiques et de croissance), il fut décidé de mettre en place 90 placettes temporaires réparties sur la région. Le plan d'échantillonnage des placettes est présenté ci-après.

8

Plan d'échantillonnage des placettes

La zone d'échantillonnage s'est basée sur les données de présence du Pin sylvestre dans la région, issues de la base de données BD_FORET_V2 de l'Inventaire Forestier National (2007). La sélection des placettes a été réalisée au sein d'une maille systématique de 50 m de côté, appliquée à l'échelle des parcelles de pin sylvestre présentes sur la région PACA. Aucune placette n'a été retenue dans les Alpes Maritimes en raison des nombreuses données existant déjà grâce à l'Observatoire Départemental du dépérissement.

150 points ont ainsi été retenus, de façon aléatoire, en répondant aux trois critères de stratification suivants (= échantillonnage aléatoire stratifié) : l'altitude, l'indice de climat lumineux (IKR) lié à l'exposition et à la pente et l'indice de bilan hydrique topographique (TPI) lié à la topographie (voir définitions en page suivante). Seules 90 placettes ont ensuite été définies au hasard comme prioritaires, les 60 points restants servant de points de remplacement en cas de rejet d'une placette sur le terrain.



Localisation des 90 placettes de Pin sylvestre échantillonnées



Critères de stratification de l'échantillonnage

Les critères de classe pour chacun des trois paramètres de stratification ont été définis à partir des seuils de dépérissement identifiés par l'ONF (2016), ainsi que par Thabeet (2008). Ces études ont mis en évidence des dépérissements plus importants à basse altitude, en haut de versant, ainsi que sur les versants frais ou chaud en fonction des dates. Les classes retenues à dire d'expert pour chacun des critères de stratification sont :

- Pour l'altitude : >1200m / < 1200m ;
- Pour l'IKR : <0.95 (versant frais) / 0.95-1.07 (horizontal ou versant neutre)/ >1.07 (chaud)
- Pour le TPI (estimé dans un rayon de 100 m autour du point) : <-0.8 (bas de versant ou fond de vallée) / -0.8< et<0.8 (milieu de versant ou plan horizontal) / >0.8 (haut de versant ou crête).

ALTITUDE	IKR <0.95 FRAIS			IKR 0.95 à 1.07 NEUTRE			IKR > 1.07 CHAUD		
	TPI <-0.8	TPI de -0.8 à +0.8	TPI >0.8	TPI <-0.8	TPI de -0.8 à +0.8	TPI >0.8	TPI <-0.8	TPI de -0.8 à +0.8	TPI >0.8
>1200 m	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl
<1200m	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl	5 pl

Répartition des 90 placettes selon les critères de stratification.

L'IKR désigne l'indice de climat lumineux défini par Becker en 1979. Il exprime l'énergie lumineuse reçue par une station, en pourcentage de l'énergie reçue par un plan de référence de même surface mais parfaitement horizontal. Il prend donc en compte l'exposition et la pente. Cette variable joue un rôle important dans la potentialité forestière car c'est à cette échelle que se mesure l'énergie solaire effective reçue par une unité de surface (Ripert & Vennetier, 2002).

L'indice IKR se calcule par la formule suivante :

$$ikr = \frac{\sin(C - \arctan(\text{pente} * \cos(\text{exposition})))}{\sin(C)}$$

La pente et l'exposition sont exprimées en radians. C est une constante liée à la latitude (angle moyen du soleil sur l'année). Plus la station est exposée sud avec une pente forte plus l'IKR est élevé (station chaude >1.07). Plus une station est exposée nord avec une pente forte plus l'IKR est faible (station froide <0.95). Une station plane et horizontale, ou exposée plein est ou plein ouest, aura un IKR égal à 1.

Le TPI (Topographic Position Index) mesure la position topographique relative d'un point. Il se base sur la différence d'altitude entre ce point et l'altitude moyenne des points voisins. Cet indice permet de dégager les grandes formes de relief. Il dépend de la résolution du MNT. Il a ici été déterminé par SIG sur le MNT au 25m de l'IGN, sur un rayon de 100m, à l'aide du TPI proposé par GDAL de Qgis. Les classes de TPI utilisées pour l'échantillonnage sont celles de Weiss (2001).

Cas de rejet des placettes sur le terrain

Suite à la sélection aléatoire des 90 placettes dans la maille systématique, les coordonnées de chaque placette sont saisies dans le GPS. L'opérateur se rend ensuite sur le terrain, par navigation, sur le point précis défini par les coordonnées de la placette. La placette est rejetée si elle présente l'un ou plusieurs des critères suivants :

- Signe d'exploitation forestière inférieure à 10 ans
- Hauteur du peuplement inférieure à 3m ou diamètre moyen inférieure à 10cm
- Moins de 4 pins sylvestres dominants dans un rayon de 15m
- Point situé dans une trouée, un chemin forestier,...
- Inaccessibilité de la placette

En cas de rejet de la placette, l'opérateur utilise un protocole systématique pour définir le nouveau point. Il se rend 50 m d'abord au nord du point GPS initial, il l'installe en ce point si les critères de sélection sont remplis. Si la placette ne répond toujours pas aux critères, il tente à 50 m à l'est, puis au sud, puis à l'ouest. Si la placette ne répond toujours pas aux critères, il va 100 m au nord et ainsi de suite. Si dans un rayon de 100 m aucune placette de mesures ne peut être installée, la placette est rejetée. L'opérateur sélectionne alors une placette remplaçante répondant au même critère de stratification et la plus proche parmi les 60 placettes de remplacement.

Données relevées sur les placettes

Plusieurs types de variables ont été relevées sur le terrain :

- variables attestant de l'état sanitaire des arbres,
- variables topographiques et édaphiques,
- variables dendrométriques,
- variables biotiques.

La fiche de relevés de terrain se trouve en annexe 6. Une tablette a été utilisée pour relever les données. L'ensemble des données relevées est compilé dans un tableau qui se trouve en annexe 7.

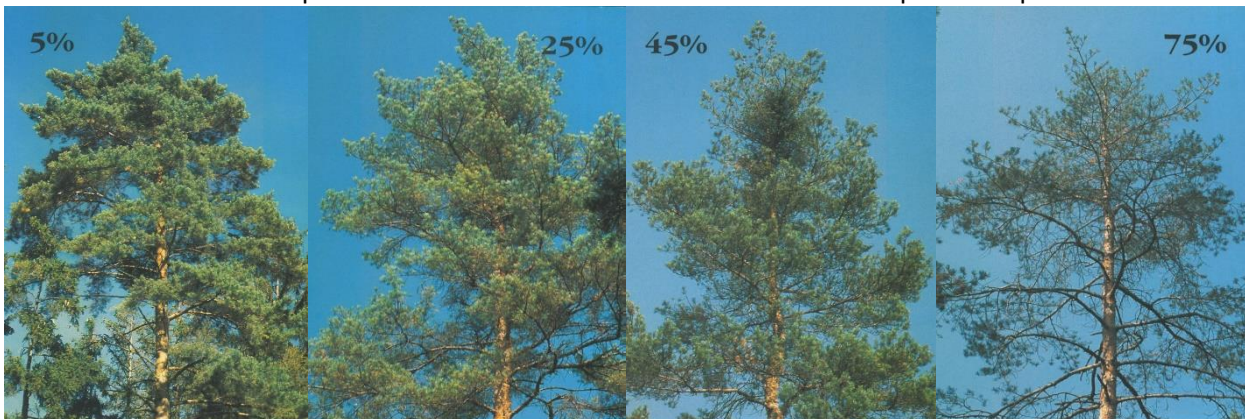
Etat sanitaire des peuplements

Sur chaque placette, vingt pins sylvestres dominants ou co-dominants sélectionnés autour du point GPS central de la placette sont retenus (numérotation des arbres à la craie). L'évaluation de l'état sanitaire est réalisée selon le protocole DEFIFOL du Département de Santé des Forêt (DSF) destiné à l'évaluation de l'état sanitaire des résineux.

Pour chaque arbre, les paramètres relevés sont :

- l'estimation visuelle de **défoliation du houppier (%)** par rapport à un arbre pleinement folié de référence en utilisant des photos standards (voir ci-dessous),
- le **nombre de nids de chenilles processionnaires** (*Thaumetopoea pityocampa*),
- la **proportion de gui** (*Viscum album L.*) dans le houppier fonctionnel en pourcentage d'occupation du houppier par rapport au feuillage,
- la **microphylie** en pourcentage de volume du houppier (une branche étant considérée microphylle lorsque ses aiguilles mesurent moins de la moitié de leur taille supposée normale),
- la proportion de **décoloration** dans les branchages en pourcentage de volume du houppier.

Les branches et les aiguilles situées en-dessous de la partie fonctionnelle du houppier, ainsi que dans la partie interne ombragée de l'arbre ne sont pas prises en compte dans l'estimation des paramètres ci-dessus. La validation du protocole et la formation des notateurs ont été supervisées par le DSF.



Photos de référence de l'état de défoliation de houppier de Pin sylvestre. (Taux de défoliation, en pourcentage d'un houppier pleinement folié) Source : Couronnes d'arbres – wsl/sanasilva – 1990



Critères dendrométriques

La structure du peuplement pouvant influencer la croissance des arbres et leur état sanitaire, des critères dendrométriques ont été mesurés. Pour chaque placette, la hauteur et l'âge moyen des arbres concernés sont évalués, le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) est mesuré à l'aide d'un mètre puis moyenné à l'échelle de la placette. La surface terrière est mesurée avec un relascope pour appréhender la densité du peuplement. Le nom d'une seconde espèce arborée éventuellement présente, ainsi que le nom et la proportion de l'espèce buissonnante principale sont relevés.

Critères topographiques

La circulation d'eau est largement influencée par le relief environnant : la topographie, l'exposition, la pente (Ripert & Vennetier, 2002). Un relevé topographique est donc effectué afin d'apprécier le niveau de disponibilité en eau de la placette. Les critères suivants sont mesurés : l'orientation de la placette (en degrés et par classes : N, NE, E, SE, S, SO, O), la pente (%), les topographies transversale et longitudinale (c'est-à-dire la courbure du terrain dans le sens perpendiculaire et parallèle à la pente respectivement - Convexe, Plan, Concave), la situation de la placette sur la pente (crête, haut/milieu/bas de versant, fond de vallée, plaine/plateau), le confinement (absent, faible, fort) dans le paysage par rapport au relief environnant. Les sommets ou une topographie convexe sont propices aux départs d'eau, contrairement aux situations en bas de versants ou aux stations concaves.

Critères édaphiques

Une fosse creusée à l'aide d'une pioche proche du point central de chaque placette a permis de déterminer les caractéristiques édaphiques de la station : le pH eau du sol à 20 cm de profondeur a été relevé, ainsi que la texture des horizons, la proportion d'éléments grossiers (%), la profondeur des horizons et la profondeur totale du sol (cm) et la réaction au HCL à 10 cm de profondeur (oui/non). La proportion d'affleurement de la roche mère (%) a été évaluée visuellement en surface de la placette. La réserve utile de surface a été calculée selon la formule suivante :

$$RU = \text{indice texture du sol} * \text{profondeur totale (cm)} * \left(1 - \left(\frac{\% \text{ éléments grossiers}}{100} \right) \right)$$

Où l'indice texture du sol est défini à partir de la clé de détermination de Vennetier & Ripert, (2003)

Il n'est pas possible d'évaluer véritablement la profondeur de sol avec les moyens impartis (fosse creusée à la pioche).

L'indice topo-édaphique

Une grille de notation développée pour l'étude des potentialités forestières en basse Provence par Ripert & Vennetier (2002) a été utilisée pour déterminer un indice topoédaphique de chaque station à partir des critères topographiques et édaphiques relevés sur les placettes. Cet indice reflète le bilan hydrique du sol et la fertilité de la placette. Les paramètres de la grille non mesurés sur le terrain sont notés 0. Chaque placette obtient ainsi une note selon le caractère favorable ou défavorable du bilan hydrique : >15 = très favorable ; [5;15] = favorable ; [-5;5] = neutre ; [-15;-5] = défavorable ; <-15 = très défavorable.

		facteurs défavorables				facteurs neutres				facteurs favorables				
TOPOGRAPHIE	topographie générale	sommet	croupe	-14	haut de pente	-6	pente	-3	plateau	0	bas pente	10	vallon vallée	18
	topographie stationnelle				convexe	-8			plan	0	concave	8		
	banquettes								absence	0	présence	13		
	pente du terrain						> 27° ou 50%	-1	< 27° ou 50%	0				
ROCHE	affleurement rocheux	>= 30%		-8	10 - 30%	-3	1 - 10 %	-1	0	0				
	affleurement de cailloux				>= 30%	-3	10 - 30%	-2	1 - 10 %	0	0	2		
	pendage / pente (sur altérite et colluvion < 80 cm)						défavorable	-1	neutre	0	favorable	1		
	Diaclases (sur altérite et colluvion < 80 cm et pendage défavorable ou neutre)						absentes	-2	quelques	0	nombreuses	3		
MATÉRIAU	matériau de référence	roche		-4	altérite	-2	lapiaz	-1			colluvium	5		
	HCl terre						forte	-2	faible	0	nul	3		
	éléments grossiers	>= 90%		-7	60-90%	-3			30-60%	0	< 30 %	4		
	plaquettes horizontales				présentes	-6			absentes	0				
	réserve utile / texture **	<= 0,7mm/cm		-10	1 à 1,3	-3			1,35 à 1,6	0	1,7 à 1,95	5	2	10
PROFONDEUR	épaisseur de la colluvion				absent	-2	5-20 cm	-1	25-50 cm	0	> 50 cm	3		
	profondeur totale	0-20 cm		-12	25-45 cm	-5			50-75 cm	0	75-100	5	> 100 cm	10
	tests tarière						0-20 cm	-2	21-40 cm	0	41-75cm	2	> 75 cm	3

indice topo-édaphique = [] + [] + [] + [] + [] + [] + [] + []

Clef permettant de calculer la valeur de l'indice topo-édaphique pour évaluer la productivité forestière d'une placette à partir des données topoédaphiques relevées sur le terrain (Source: Ripert & Vennetier, 2002).

Données dendroécologiques

Par ailleurs, un sous-échantillon de 30 placettes, représentatives de tous les groupes de stratification a été sélectionné pour l'étude dendroécologique : le but est de mesurer l'évolution de la croissance et de la productivité des peuplements depuis leur origine, en mesurant la largeur des cernes annuels.

Protocole de prélèvement et d'analyse des carottes

Sur le sous-échantillon de 30 placettes dendroécologiques, des carottes sont prélevées à la tarière de Pressler sur 15 arbres. Deux carottes par arbres sont réalisées à hauteur de poitrine. En général, les arbres étant petits, des carottes traversantes prenant simultanément deux rayons opposés d'un arbre ont été réalisées. Sur les arbres plus gros, ou en cas de défaut sur une carotte, une carotte supplémentaire est prélevée dans une autre direction. Ces carottes ont été ramenées au laboratoire, séchées, poncées puis scannées. Les largeurs de cernes ont été mesurées sur les images scannées à l'aide du logiciel Windendro. L'acquisition de cette base de données a été un travail considérable, à la fois sur le terrain et au laboratoire, car cela représente au total 900 carottes (30 placettes x 15 arbres x 2 carottes).

Données issues du SIG

Données climatiques

La détermination des données climatiques à utiliser dépend des caractéristiques des données recherchées. Le Pin sylvestre en PACA se distribue surtout dans les régions montagneuses jusqu'à 2100m, or c'est dans ces zones que les variations de topographie, et donc climatiques, sont les plus importantes. Nous avons donc eu besoin de données climatiques à une échelle assez fine, prenant en compte le topoclimat, pour obtenir une plus grande précision lors de la mise en corrélation des données climatiques avec les mesures sanitaires des placettes. Le topoclimat désigne en effet une ambiance climatique particulière liée principalement à l'irrégularité du relief et à l'altitude. Il existe notamment un effet de l'altitude sur la



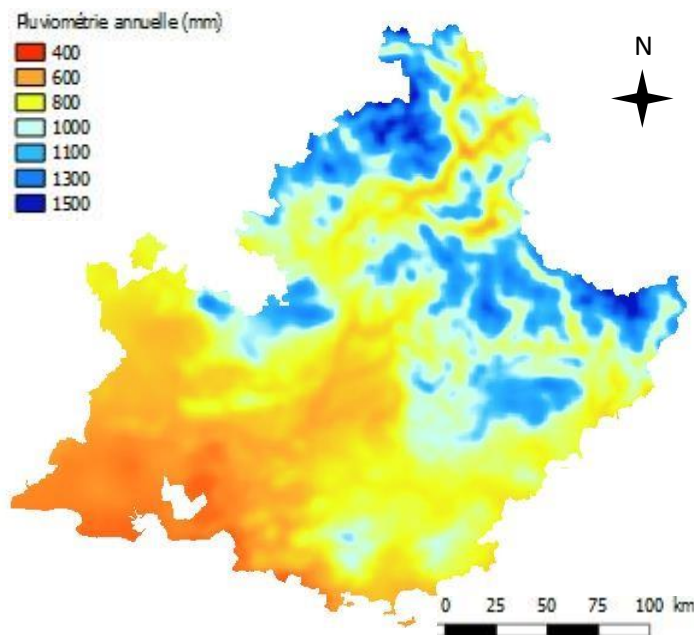
température, le rayonnement et les précipitations, ainsi qu'un effet de l'exposition sur la température et le rayonnement (Lebourgeois, 2002).

Nous avons opté pour des modèles de données climatiques spatialisés développés par Météofrance pour la pluviométrie et la température (modèle AURELHY et modèle SAFRAN) et de l'Agroparistech pour le rayonnement (modèle DIGITALIS).

Les données climatiques obtenues se présentent sous la forme de temporalités et de maillages différents :

- Modèle AURELHY : données de moyenne trentenaires et maillage d'1 km ;
- Modèle DIGITALIS : données de moyenne trentenaires et maillage de 50m ;
- Modèle SAFRAN : données journalières et maillage de 8 km.

Le tableau en annexe 8 présente de manière détaillée les caractéristiques de chacun des modèles.



Exemple d'un raster d'un facteur climatique généré avec le logiciel Qgis : pluviométrie annuelle sur la moyenne trentenaire 1981-2010, issu du modèle AURELHY, zoom sur la région

Correction d'échelle des données climatiques

A partir des modèles climatiques existant (AURELHY, DIGITALIS et SAFRAN), le CNPF a établi des modèles hybrides dénommé « AURITALIS » et « SAFRAUTALIS ». L'annexe 8 précise les caractéristiques de ces modèles.

Modèle AURITALIS

Dans ce projet, AURITALIS a été utilisé pour l'étude du dépérissement et lors de l'élaboration des cartes de vigilance climatique (voir partie suivante).

AURITALIS (voir Forêt Entreprise 218, <https://www.foretpriveefrancaise.com/n/bioclimsol/n:558>) fournit des moyennes trentenaires des paramètres climatiques pour la période de 1981 à 2010. Il s'agit du modèle climatique spatialisé hybride entre AURELHY et DIGITALIS. AURELHY a été choisi pour sa fiabilité en termes de spatialisation des données de températures et de pluviométrie, grâce au nombre important de stations météorologiques (3400 stations pour la pluviométrie et 1500 pour les températures sur la France). Cependant AURELHY ne fournit pas de valeur d'évapotranspiration, ni de rayonnement, et à cette échelle, le topoclimat des placettes n'est pas pris en compte. C'est pour cette raison que les données ont été

hybridées avec celles de DIGITALIS. En effet, ce dernier fournit une valeur de rayonnement au pas du 50m et tient donc compte du topoclimat. Dans AURITALIS, l'ETP Turc est calculée en combinant les données Températures d'AURELHY et Rayonnement de DIGITALIS.

Modèle SAFRAUTALIS

SAFRAUTALIS a été créé pour les besoins de ce projet, et notamment pour étudier la relation entre la croissance des pins et le climat. Pour cela, nous avons procédé à une descente d'échelle des données climatiques SAFRAN qui ont une résolution de 8 km.

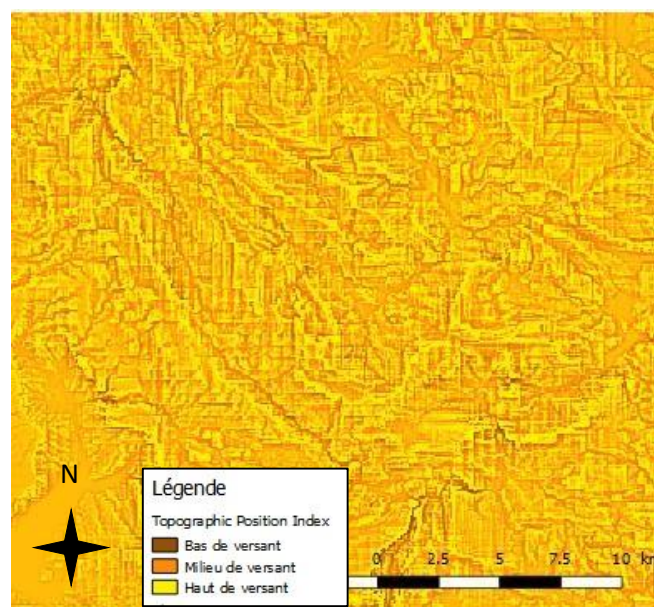
Pour la température, cette descente d'échelle s'est faite à une résolution de 50m grâce aux données altitudinales du MNT. Les données de température ont été ajustées selon le principe que la température varie de façon constante de 1°C tous les 154m. Certaines études ont néanmoins montré que cette relation n'était pas constante selon la situation géographique (montagne, plaine...) et les mois. Malheureusement une correction liée à l'exposition n'a pu être appliquée faute de modèle à disposition.

Pour l'ETP, la descente d'échelle s'est faite à une résolution de 50m grâce au modèle DIGITALIS. L'ETP est calculée à partir des données SAFRAN selon le modèle de Turc et est ensuite corrigée au pas du 50 m en prenant en compte le modèle de correction de DIGITALIS. Ce modèle de compensation ou d'aggravation du rayonnement intègre l'effet de versant et l'effet de masque lié à la topographie (http://silvae.agroparistech.fr/home/?page_id=690).

Pour les précipitations, la descente d'échelle s'est faite à une résolution d'1km grâce au modèle AURHELY. Tous les traitements ont été effectués par SIG sous qgis et grass. Nous attirons l'attention du lecteur pour dire qu'un tel modèle est expérimental et nécessite d'être pris avec prudence.

Données stationnelles et topographiques

L'altitude est une donnée qui a été obtenue à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'IGN au pas de 25m. Différents indices sont de plus calculables sous SIG grâce à ce MNT. Il s'agit de l'IKR, lié à la pente et à l'exposition, et du TPI, lié à la topographique (voir définitions en page 7). Ces indices présentent alors une échelle très fine (25 m de résolution). Ils ont ainsi pu être attribués aux 90 placettes échantillonnées. Un exemple de carte du TPI spatialisé, généré au pas de 25m, est présenté ci-dessous.



Exemple de carte des positions dans la pente (TPI, topographic position index) générée au 25m. Zoom sur une zone des Alpes du Sud.

Traitement des données

L'ensemble des données collectées sur le terrain (sol, topographie, peuplements ...) ainsi que les variables calculées sous SIG ont été rassemblées dans une base de données. L'annexe 9 présente la liste des variables.

Chacune des variables sanitaires relevée sur chaque arbre a été moyennée à l'échelle de la placette. Une catégorie a également été attribuée à chaque placette à partir du taux moyen de défoliation, sur la base du protocole DEFIFOL du DSF : c0 (0-5% de défoliation moyenne des houppiers sur la placette), c1 (6-25%), c2 (26-50%), c3(51-75%), c3+ (76-95%), c4 (96-100%). Une défoliation de 100% correspond à la mort de l'arbre. Ici le taux de mortalité a été défini comme le nombre d'arbres morts dont au moins une partie importante du tronc restait debout (présentant 100% de défoliation) rapporté au nombre total d'arbres mesurés sur la placette (20). Les arbres morts au sol n'ont malheureusement pas été évalués.

Selon le DSF, une placette est considérée comme dépérissante si au moins 20 % des arbres dominants ou co-dominants présentent au moins 50 % de défoliation en tenant compte de la microphyllie.

Un premier traitement des données a été réalisé à l'échelle de la placette, et ce pour les 90 placettes inventoriées.

Un second traitement a été conduit à l'échelle de l'arbre pour les données dendroécologiques, mais aussi pour interpréter les données sanitaires (relation entre l'état sanitaire et la présence de gui et de nids de chenille processionnaire).

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 évalués à l'aide de la méthode de régression PLS (Partial Least Square régression). Cette technique de régression multifactorielle vise à prédire les valeurs prises par une variable cible (à expliquer) à partir d'une série de variables prédictives corrélées entre elles, en minimisant l'effet de ces corrélations. Dans la PLS, une méthode pas à pas a été pratiquée afin de sélectionner les variables les plus significatives, qui contribuent à maximiser le pourcentage de variance expliquée de la variable cible, tout en tentant d'améliorer la qualité de prédiction et la robustesse du modèle. Les variables ont été sélectionnées dans un intervalle de confiance de 95%. Ce traitement statistique se démarque par sa capacité à traiter les problèmes avec un grand nombre de descripteurs, avec des descripteurs colinéaires, voire lorsque le nombre de variables prédictives est supérieur au nombre d'observations. Ce sont des situations que l'on rencontre fréquemment dans l'analyse de données de milieu forestier où les variables sont générées en grand nombre. Il y a, dans cette étude, une cinquantaine de descripteurs pour 90 observations.

La qualité de prédiction des modèles de type absence/présence de dépérissement a été testée avec les techniques d'arbres de décision comme le tree C4.5, la régression logistique et la PLS. La robustesse de prédiction de ces modèles a été testée par validation croisée et bootstrap.



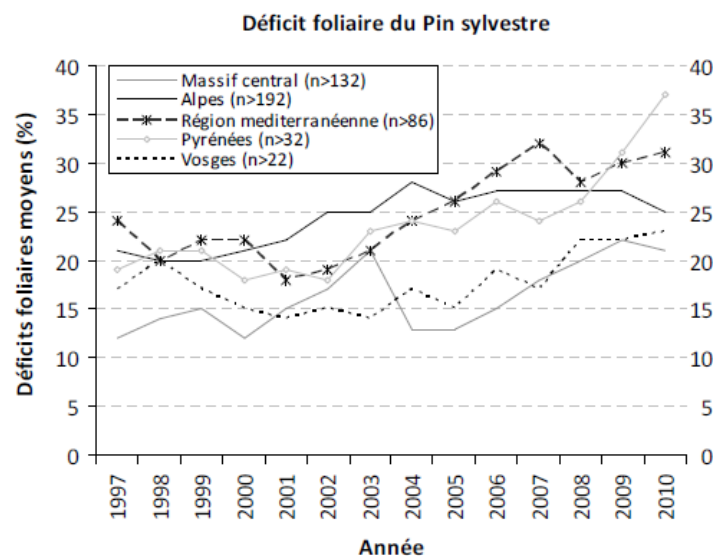
RESULTATS

Avant de présenter les résultats issus de ce projet, les principaux résultats d'autres études sur le dépérissement du pin sylvestre sont présentés.

Résultats issus d'autres études

Dépérissement du pin sylvestre à l'échelle de son aire de répartition

D'après de nombreux cas rapportés depuis moins de trente ans à l'échelle européenne, il semble que le dépérissement du Pin sylvestre soit en recrudescence en marge de son aire de répartition (Allen *et al.*, 2010). L'évolution du déficit foliaire moyen mesuré sur le réseau systématique du département de la santé des forêts (DSF) traduit bien la dégradation de l'état de santé des pinèdes sylvestres dans plusieurs massifs montagneux français. Cette dégradation est particulièrement marquée dans les Pyrénées, où le déficit foliaire a presque doublé en 10 ans, ainsi que dans les Alpes et le Massif central. La région méditerranéenne est particulièrement touchée par la dégradation de l'état de santé du Pin sylvestre, avec une augmentation du déficit foliaire de 50 % en 10 ans. L'année 2003 semble être une année charnière pour ces évolutions. La question du lien entre ces évolutions et celles mises en évidence pour le climat se pose alors.

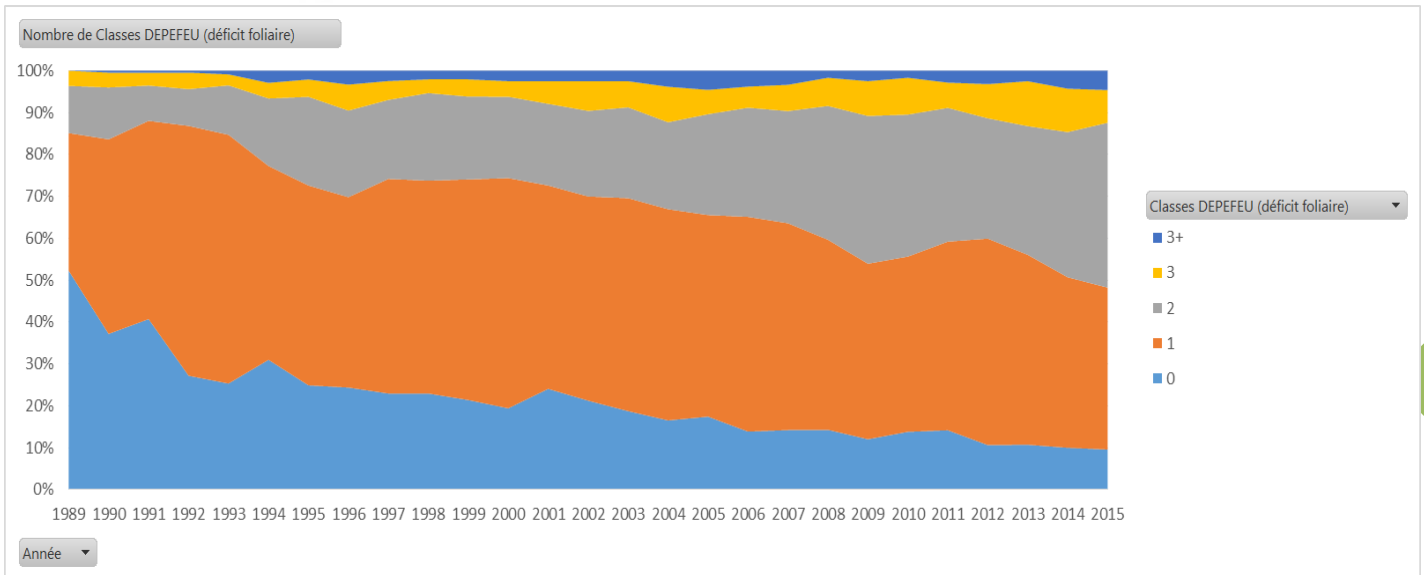


Évolution du déficit foliaire du Pin sylvestre dans les principaux massifs montagneux français, mesuré sur les placettes du réseau systématique de surveillance du DSF. Les notes de déficit foliaire sont moyennées sur les arbres des placettes d'un massif. Le nombre minimum d'arbres observés pour chaque massif est indiqué entre parenthèses (Source :Thauvin, 2011, issu des données du DSF 2011)

Constats de dépérissements dans la région PACA

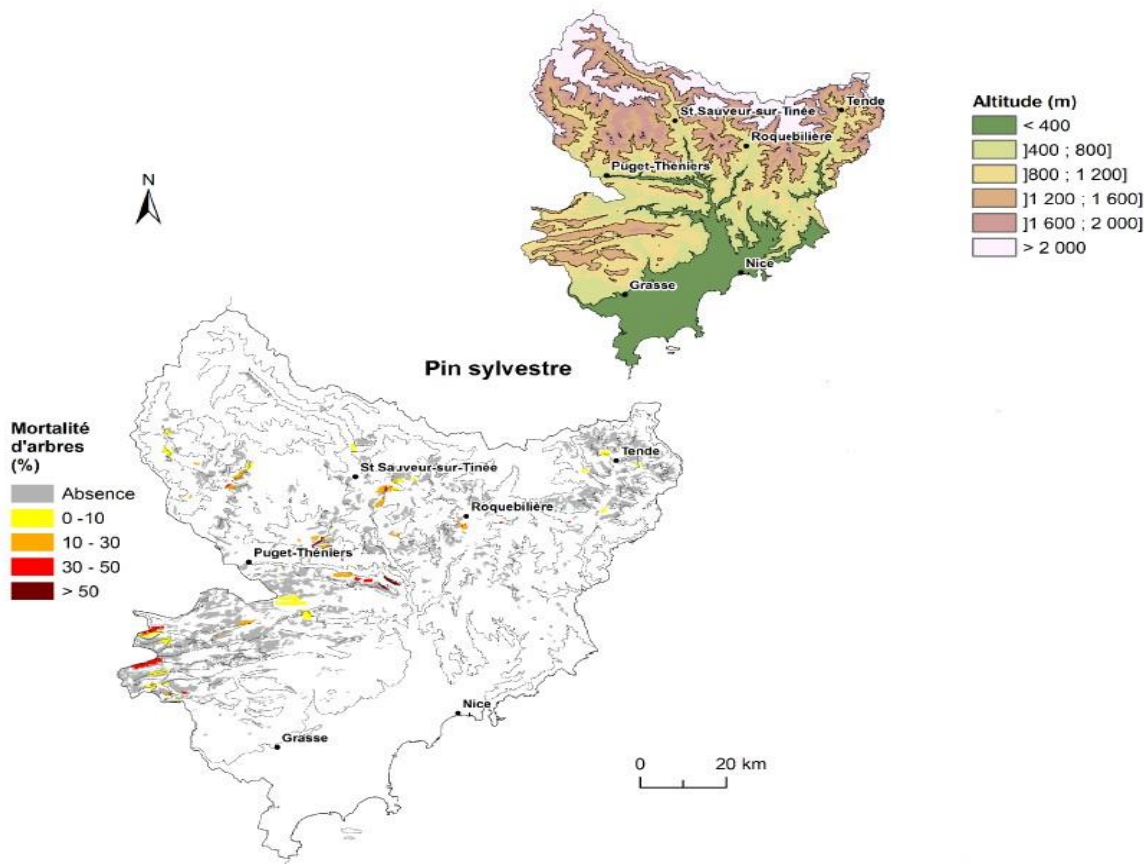
Depuis 2003, les houppiers de pins présentent une transparence anormale due à un déficit foliaire marqué, accompagné de microphyllie et d'une faible ramification (Vennetier *et al.*, 2008). La canicule de 2003 a joué le rôle de facteur déclenchant, d'importantes pertes d'aiguilles (jusqu'à 60 %) ayant été enregistrées. Les effets de la canicule étant combinés à une séquence pluriannuelle de déficits hydriques élevés, les pins sylvestres ont présenté une importante mortalité.

Le dépérissement qui a débuté en 2003 s'est accentué en 2006, et était visible par imagerie satellitale (Thabeet, 2008). Sur le réseau de placettes permanentes du DSF, il a pu être constaté une forte augmentation du déficit foliaire (voir graphique ci-après).



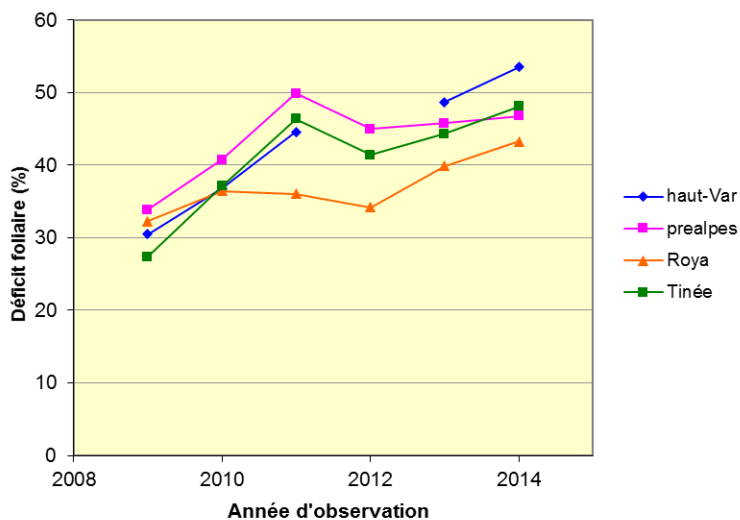
Evolution du déficit foliaire sur le réseau de placettes permanentes du DSF (source du graphique : DSF)

Depuis 2008, l’Observatoire du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes procède à un suivi des dépérissements dans le département. Il dresse un état des lieux de la santé des forêts à l’échelle du département sur des placettes permanentes, par suivi sanitaire et cartographie périodique. La carte des mortalités de l’essence en 2011 sur le département est présentée ci-après. Le suivi de la défoliation fait encore état d’une augmentation de la défoliation du Pin sylvestre de 10 à 22% en 5 ans, de 2009 à 2014 selon le secteur concerné (ONF, 2016).



Carte de la mortalité du Pin sylvestre observée dans les Alpes-Maritimes par l’ONF en 2011 (source : Thauvin, 2011)





Evolution du déficit foliaire par groupe de placettes (Source: ONF, Observatoire Départemental du dépérissement des forêts des Alpes Maritimes).

Les facteurs de dépérissement identifiés dans la littérature

Facteurs stationnels

Le pin sylvestre est généralement considéré comme une essence résistante à la sécheresse. Mais ce caractère trouve ses limites aux marges inférieures et sud de son aire de répartition (Martínez-Vilalta & Piñol, 2002). Bréda et al., (2004) signale une sensibilité du Pin sylvestre à la cavitation, ce qui pourrait compromettre sa capacité à résister à une augmentation de l'aridité en zone méditerranéenne (Martínez-Vilalta & Piñol, 2002). Différentes études ont montré une réduction de l'accroissement annuel moyen en réponse à la sécheresse (Bigler et al., 2006; Thabeet, 2008; Herrero et al., 2013; Marqués et al., 2016), notamment en relation avec les températures estivales (Thabeet, 2008; Herrero et al., 2013).

L'importance des variables telles que l'altitude et l'exposition dans les dépérissements de Pin sylvestre a été mise en évidence, notamment dans un contexte d'influence de la sécheresse. Les peuplements de basse altitude semblent plus propices au dépérissement. Ce constat a été réalisé à partir d'une approche satellitale via le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ainsi qu'à partir d'une approche dendrochronologique dans l'arrière-bassin méditerranéen (Thabeet, 2008) et la Péninsule Ibérique (Marqués et al., 2016). En altitude, les peuplements en expositions nord et ouest, ou bien en zone plate se sont montrés plus sensibles au dépérissement (ONF, 2016; Thabeet A., 2008; Vennetier et al., 2008). A basse altitude, ce sont plutôt les peuplements en versant sud qui ont été atteints (ONF, 2016). Les sols superficiels et un pH élevé semblent également générer plus de dépérissement.

Facteurs biotiques

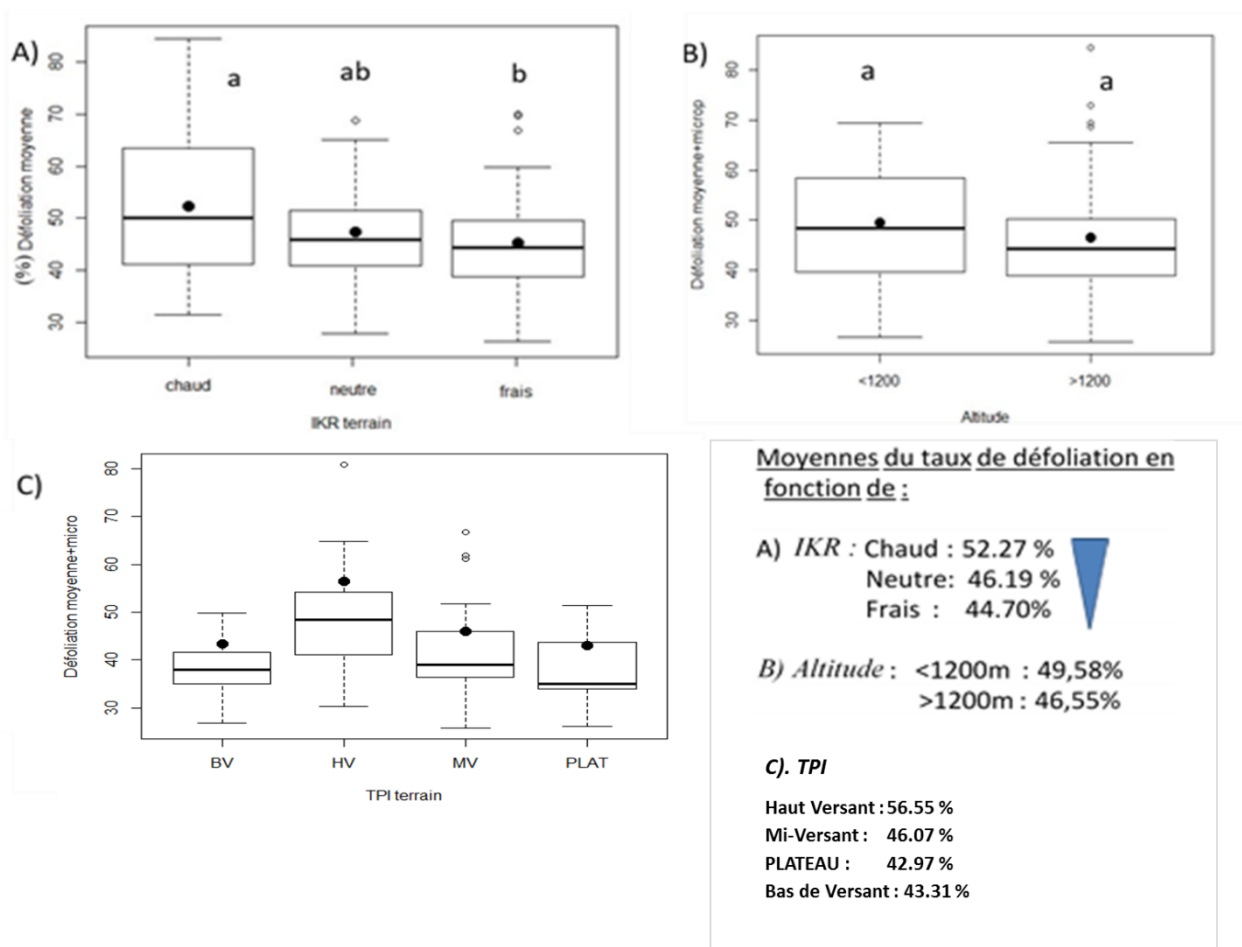
Il existe une corrélation positive entre la défoliation et le taux de présence du gui (Dobbertin & Rigling, 2006; Galiano et al., 2010). L'étude de Dobbertin et al., (2005) confirme de plus la contribution du gui à la mort prématurée du Pin sylvestre dans le Valais Suisse.

La défoliation causée par la chenille processionnaire génère une réduction de la croissance et des capacités de reproduction du Pin sylvestre, ce qui met en péril la régénération de ces peuplements (Hóðar et al., 2003). Une perte d'accroissement annuel moyen et d'accroissement radial moyen - mesurés en France (Laurent-Hervouet, 1986) et en Turquie (Kanat et al., 2005) - a été mise en évidence, suite à des infestations. Une période de récupération de 3 ans suite à l'infestation semble nécessaire aux pins pour recouvrer leur croissance normale (Hóðar et al., 2003).

Résultats issus des données relevées sur l'état sanitaire

Réponse de la défoliation aux variables utilisées dans l'échantillonnage

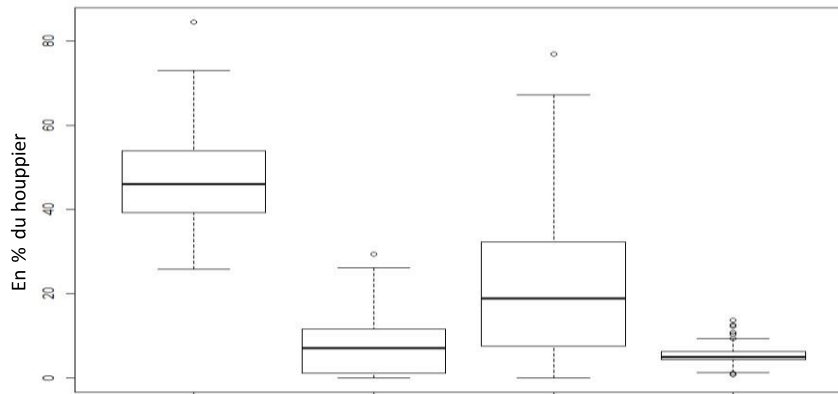
Le plan d'échantillonnage de notre étude a été construit selon des critères seuils d'altitude, d'exposition (IKR) et de position des placettes dans la pente (TPI). Il a été testé si le taux de défoliation moyen, mesuré sur le terrain, répondait de la même manière à ces seuils, grâce des analyses de variance. La figure ci-après montre un gradient de défoliation corrélé positivement avec l'IKR : le taux de défoliation moyen est significativement plus élevé sur les versants chauds ($P < 0.01$). Un taux de défoliation plus élevé sur les hauts de versants par rapport aux autres positions dans la pente ressort également ($P < 0.01$). Cependant aucune différence significative de défoliation n'a été identifiée au seuil de 1200m ($P = 0,18$).



Comparaison des moyennes de défoliation des placettes en fonction des classes A) d'IKR B) d'altitude et C) de TPI établies dans le plan d'échantillonnage

Caractérisation de l'état sanitaire des placettes

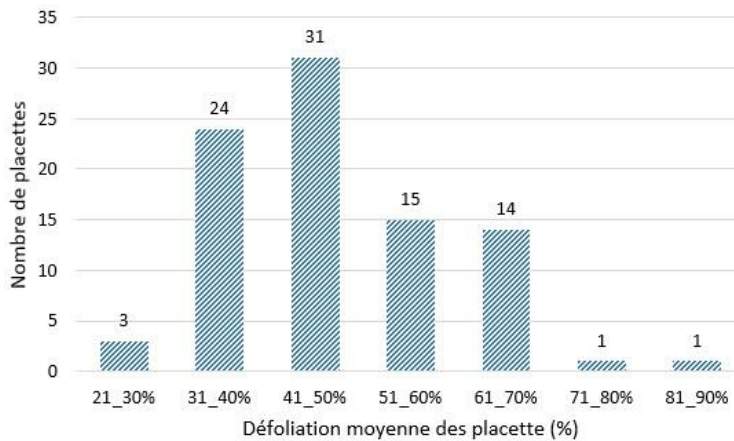
Le taux de défoliation moyen sur les placettes est de 48%. Ce dernier n'est toutefois pas le reflet des conditions moyennes de présence du Pin sylvestre ; l'échantillonnage des placettes ayant été conduit de manière stratifiée. On pourrait supposer qu'il est surévalué étant donné qu'au-delà de 1200 m le pin sylvestre est plus présent. Toutefois, même au-delà de 1200 m le taux de défoliation moyen est supérieur à 40 %.



Variable	Défoliation (%)	Gui (%)	Microphyllie (%)	Décoloration (%)
Moyenne	48 %	8 %	22 %	5 %

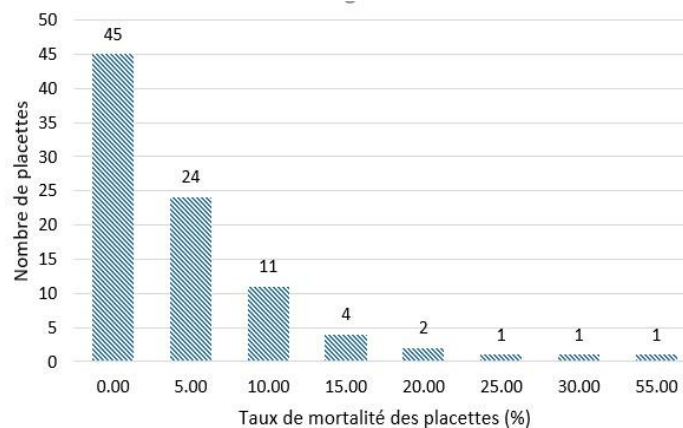
Moyennes des variables attestant de l'état sanitaire des peuplements pour une placette moyenne en PACA (en pourcentage d'occupation du houppier).

Pour le Pin sylvestre, une aiguille est considérée microphyllie dès qu'elle est inférieure à 3.5 cm. D'après quelques placettes où les aiguilles ont été mesurées réellement, la microphyllie est potentiellement sous-évaluée : sur certains arbres, il n'existe plus d'aiguilles de taille normale. Faute d'une référence, on ne juge comme microphyllies que les pousses de la pire des 3 dernières années, alors que les autres le sont aussi.



Classe de défoliation DEFIFOL:	% de placettes concernées
c0 (0-5%)	0%
c1 (6-25%)	0%
c2 (26-50%)	65%
c3 (51-75%)	34%
c3+ (76- 95%)	1%
c4 (96-100%)	0%

Effectifs des placettes par taux de défoliation moyen de leurs houppiers (en %) et correspondance avec la classification DEFIFOL.

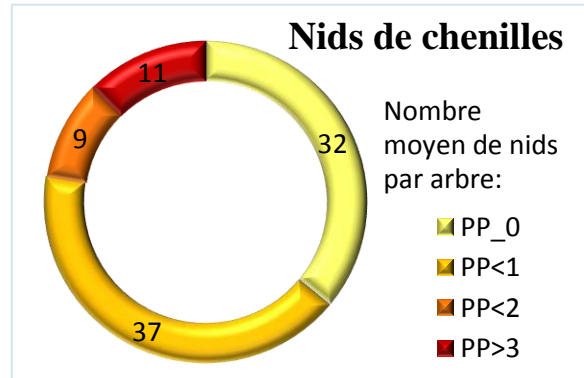
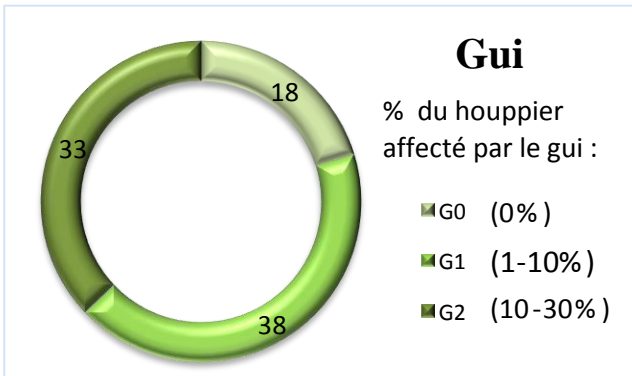


Effectifs des placettes en fonction de leur taux de mortalité (n=89).



Deux-tiers des placettes sont catégorisées en classe c2, soit avec des signes de stress assez marqués. Pour rappel, selon le DSF, une placette est considérée comme dépérissante si 20% des arbres présentent plus de 50% de perte foliaire (placettes c3 ou plus). Parmi les 90 placettes, 61% sont considérées comme dépérissantes à ce seuil de 20 %. Si on considère un seuil de 30 % d'arbres ayant plus de 50% de perte foliaire, une placette sur deux est dépérissante.

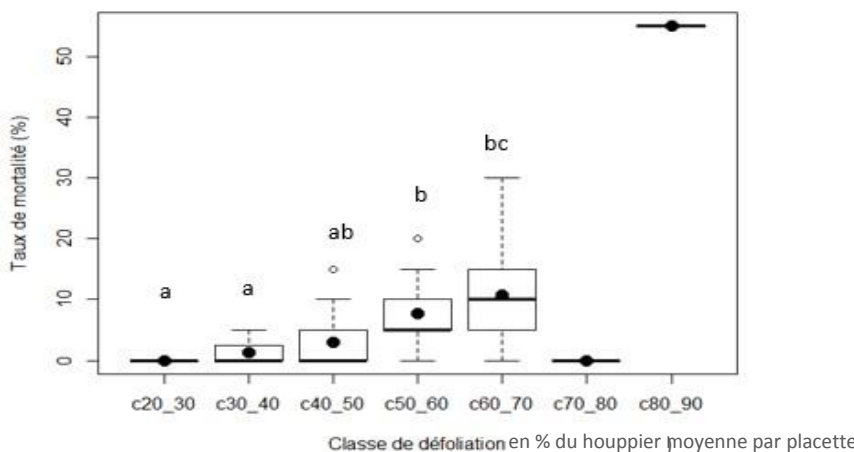
La moitié des placettes a un taux de mortalité sur pied inférieur à 5%, mais 22% de celles-ci présentent un taux de mortalité supérieur ou égal à 10%. Le taux de mortalité moyen sur l'ensemble des placettes est de 5%. On rappelle qu'il ne s'agit que des mortalités récentes (arbres encore sur pied).



Effectif de placettes en fonction du taux d'infestation des houppiers par le gui et du nombre moyen de nids par arbre

Les placettes sont relativement touchées par le gui, avec 79% d'entre elles présentant du gui dont 37 % avec un taux d'occupation moyen des houppiers supérieur à 10%.

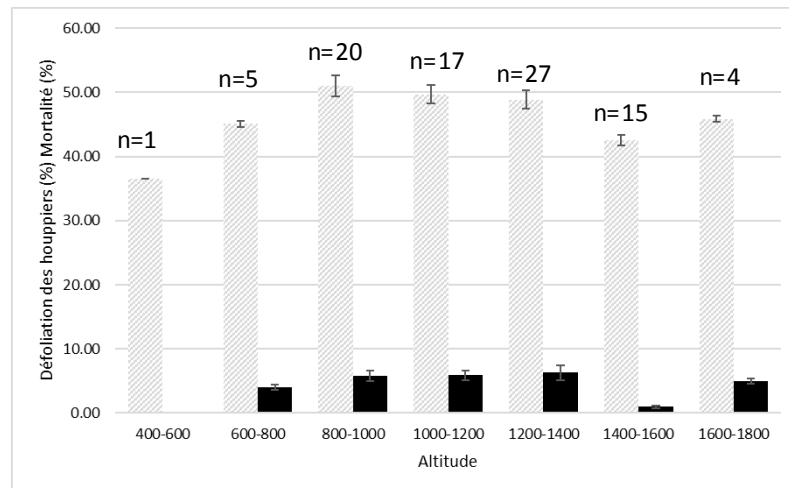
Le nombre de nids de chenille moyen par placette est de 11,8 ; soit moins d'un nid par arbre : ¼ des placettes sont dans ce cas, dont presque la moitié avec aucun nid de chenilles. Mais certaines placettes peuvent atteindre jusqu'à 120 nids, soit 6 nids par arbre en moyenne.



Comparaison des taux de mortalité en fonction du taux de défoliation des placettes

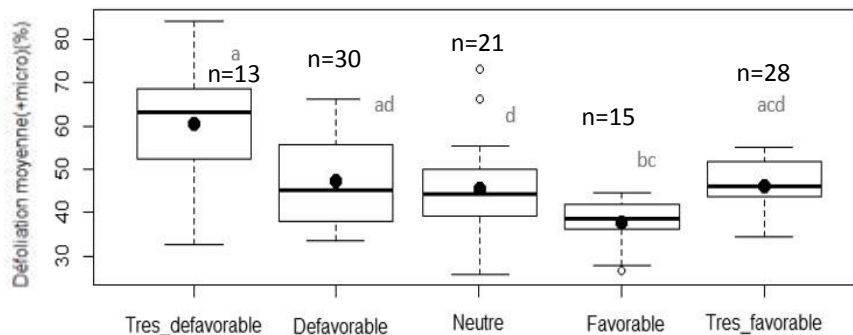
Une corrélation positive entre le taux de mortalité et le taux de défoliation a pu être démontré ($r = 37,9\%$, $P < 0.001$). A partir d'un taux de défoliation moyen du houppier de 50%, on observe un taux de mortalité significativement plus élevé ($P < 0.01$), appuyant le choix de considérer par la suite le dépérissement par la variable « Taux_depe50 » qui correspond au pourcentage d'arbres avec une défoliation supérieure à 50%.





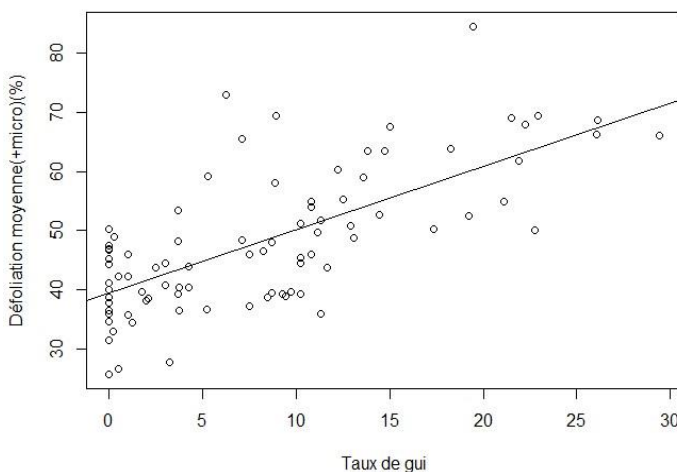
Comparaison des taux de défoliation en fonction des classes d'altitudes

Le taux de défoliation est toujours supérieur à 40 % et semblerait légèrement diminuer au-delà de 1400m. Cependant aucune différence significative n'a été détectée (P =0.364).



Comparaison du taux de défoliation des placettes selon leur indice topo-édaphique

Hormis les placettes présentant un indice topo-édaphique très favorable, qui ne montrent pas de différence significative du taux de défoliation avec les autres classes, un gradient de défoliation peut être constaté, négativement corrélé à l'indice topo-édaphique.



Relation linéaire simple entre le taux de présence de gui (%) et le taux de défoliation moyen

Une corrélation positive entre le taux d'infestation du gui et le taux de défoliation des houppiers a été



mise en évidence ($r = 0.47$, $P < 0.01$) ainsi qu'entre le taux de mortalité et le taux de présence de gui dans une moindre mesure ($r = 0.24$, $P < 0.01$). Cependant aucune relation n'a été détectée entre le taux de défoliation et le nombre de nids, bien que les chenilles soient des insectes défoliateurs qui se nourrissent des aiguilles des pins. Cette absence de relation vient de la distribution spatiale très irrégulière des chenilles: elles défolient parfois des arbres dans des zones où ils sont peu affectés par le climat, et épargnent des zones défavorables où ils sont affaiblis et déjà transparents. De plus, elles ne touchent que rarement tous les arbres d'une placette, rendant le taux moyen très variable au sein d'une placette. Enfin, elles se multiplient de préférence sur les arbres dominants les plus vigoureux (effet silhouette), et les ramènent au niveau des plus faibles non attaqués. Si on analyse la défoliation relative au sein des placettes, les arbres attaqués sont plus défoliés que leurs voisins non-attaqués.

Enfin, aucune relation linéaire simple n'a pu être mise en évidence entre des variables décrivant le dépérissement et des variables climatiques en moyenne trentenaire.

Détermination d'un modèle explicatif multifactoriel du dépérissement

Les relations simples donnent un premier aperçu des liens qui peuvent exister entre certaines variables explicatives et les variables liées au dépérissement. Mais le dépérissement ne pouvant être attribué à un seul agent causal, des régressions multiples (PLS) ont été utilisées pour déterminer les facteurs prépondérants. Les variables liées au dépérissement sont : le « taux_depe50 » (pourcentage d'arbres présentant plus de 50% de défoliation) et le « taux de mortalité ».

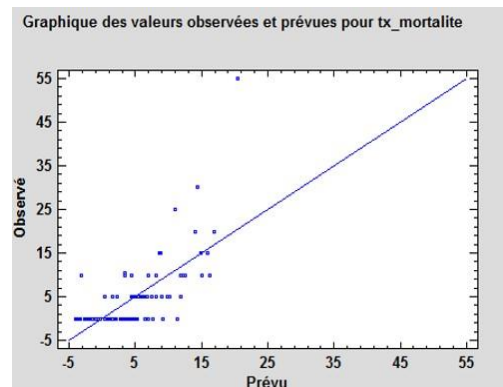
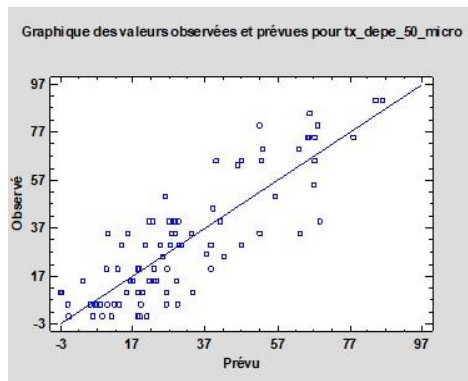
	Coefficients standardisés "Taux_depe50"		Coefficients standardisés "Taux_mortalite"
Gui_moy (Proportion de présence de gui sur la placette)	0.558661	Gui_moy	0.592151
PP_moy (Nombre moyen de nids de chenille processionnaires par arbre sur la placette)	0.329652	PP_moy	0.364741
G_Totale (surface terrière)	-0.267907	Indice_topoedaphique	-0.223772
Indice_topo_edaphique	-0.226022	G_Totale	-0.209986
		Confinement	-0.119769

Poids relatifs des variables explicatives significatives influençant les variables du dépérissement

Taux « dépe 50 »	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de Y	R ²
1	70.2012	76.2736
2	71.7292	75.1257
3	71.744	75.1744
4	71.744	75.1847

Taux « mortalité »	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de Y	R ²
1	38.8601	36.3461
2	44.1051	38.264
3	44.7368	39.5287
4	44.9958	39.918
5	45.0058	40.1633

Pourcentage de variance expliquée par les variables explicatives significatives et qualité de prédiction du modèle Composante : nombre de composantes (axes) identifié par le modèle / % cumulé de Y: % de variances expliqué par les variables significatives identifiées / R² : qualité de prédiction du modèle (%)



Comparaison des modèles explicatifs du dépérissement avec les variables "défoliation" ou "taux de mortalité" utilisées comme variables cibles par régression PLS.

24

Les deux modèles obtenus sont relativement bons :

- Celui basé sur la mortalité présente 45% de variance expliquée (« % cumulé ») et 40% de qualité de prédiction (« R^2 »)

- Celui basé sur la défoliation présente 71,7% de variance expliquée et 75,2% de qualité de prédiction.

Le modèle défoliation étant le meilleur, « tx_depe50 » restera donc la variable cible sélectionnée pour analyser le dépérissement des peuplements de pins sylvestres sachant de plus que le « tx_depe50 » est significativement corrélé à la mortalité sur pied (voir précédemment).

Des PLS ont de plus été réalisées pour analyser indépendamment les variables climatiques, topographiques et dendrométriques indépendamment du gui. Mais les modèles séparés n'expliquent chaque fois pas plus de 25% de la variance, et la qualité de prédiction ne dépasse pas 20%. Il faut donc bien analyser toutes les composantes en même temps.

Les deux variables largement prépondérantes responsables d'une forte défoliation sont des variables biotiques : le gui et la chenille processionnaire avec des poids relatifs de 56% et 33% ($P < 0.01$). L'indice topoédaphique pèse 23% dans le dépérissement : plus l'indice est faible et donc le bilan en eau et la fertilité de la station mauvaise, plus le dépérissement est important. La surface terrière est corrélée négativement au dépérissement. Moins la densité d'arbres est élevée, plus il y a de dépérissement. Ceci s'explique: d'une part par le fait que la surface terrière est en lien avec la classe de fertilité (arbres moins gros sur les mauvaises stations); d'autre part parce que la mortalité ne fait que continuer là où elle a déjà été forte dans le passé (notamment récemment entre 2003 et 2007), ce qui a éclairci les peuplements. Enfin, on constate qu'aucune variable climatique ne ressort en premier plan.

On note que la chenille processionnaire a un poids important dans le modèle alors qu'il n'y avait pas de relation significative entre le nombre de nids et le taux de défoliation. Outre l'explication déjà donnée des attaques spatialement irrégulières de chenilles, on voit ainsi que les attaques de chenilles sont liées à d'autres facteurs du milieu dont les effets couvrent les leurs. Cela démontre l'efficacité de la régression PLS pour traiter ce type de jeu de données dont les variables ne sont pas indépendantes.

L'équation suivante est obtenue, elle permet de prédire le pourcentage d'arbres présentant plus de 50% de défoliation sur une placette, et donc si une placette est dépérisante ou non.

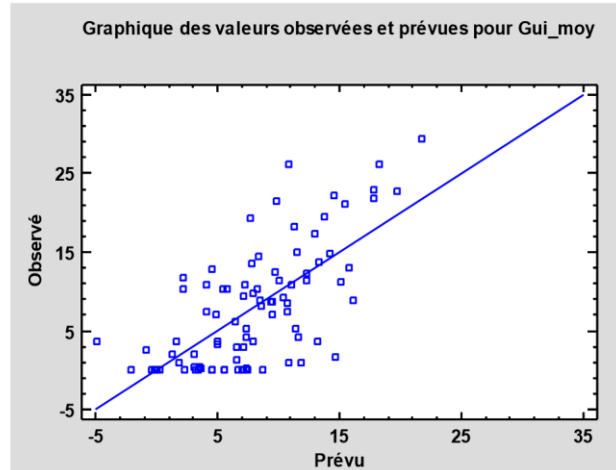
$$\text{Indice taux depe 50} = (1.82 * \text{Gui_moy}) + (6.61 * \text{PPmoy}) - (0.43 * \text{Indice_topoedaphique}) - (0.75 * \text{G_tot}) + 27.80$$

Le modèle « gui »

La part du gui est très prépondérante dans le modèle. Il a alors été jugé intéressant de générer un modèle qui explique la présence du gui, afin de savoir quelles variables influent sur sa présence.

	Coefficients non standardisés - ~Gui~
Bilan_H2O_position	-0.472448
Altitude	-0.320925
Tmoy12	-0.31407
Confinement	-0.288815
P_ETP0410	-0.258035

	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de Y	R-carré
1	33.6567	26.7514
2	44.2839	47.0217
3	47.7614	47.0927



Résultats de la PLS appliquée à la variable cible "Gui_moy"

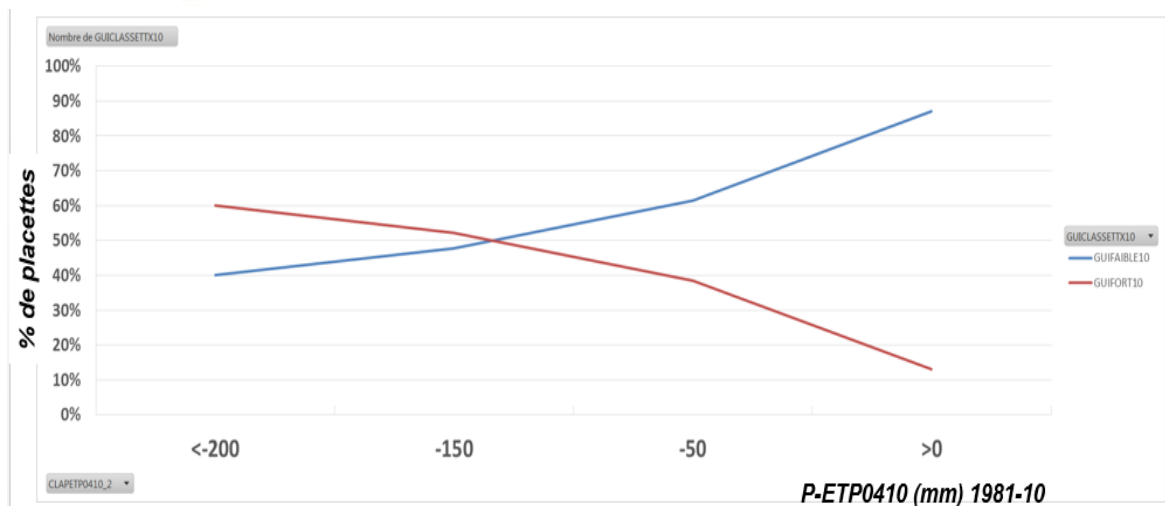
Le modèle obtenu permet d'expliquer 50% de la variance du pourcentage de gui moyen sur une placette, et la qualité de prédiction est acceptable (47%). On constate que la présence de gui semble déterminée essentiellement par des variables climatiques. La présence de gui est corrélée avec une situation hydrique édaphique défavorable de la placette, c'est-à-dire plutôt en haut de versant où les départs d'eau sont plus importants. Sa présence domine à faible altitude, où l'humidité est généralement moindre et la température plus élevée. Un faible bilan hydrique climatique sur la saison de végétation d'Avril à Octobre (P_ETP0410) favorise la présence du gui. Le confinement se révèle être défavorable pour le gui. La présence de gui sur nos placettes est donc favorisée par un microclimat chaud et sec. Ces éléments représentent bien les caractéristiques autécologiques du gui.

Cependant de faibles températures de décembre sont corrélées avec une forte présence de gui. Ce résultat va à l'encontre de la conclusion précédente. Il se pourrait qu'il reflète une limite de présence du gui : au sud de la région d'échantillonnage, le gui est moins présent. C'est sans doute une conséquence de la faible densité de pin sylvestre dans sa marge inférieure, et du morcellement des populations de cette zone. Ces deux facteurs limitent la densité des graines disponibles et leur probabilité de dissémination d'un peuplement à l'autre.

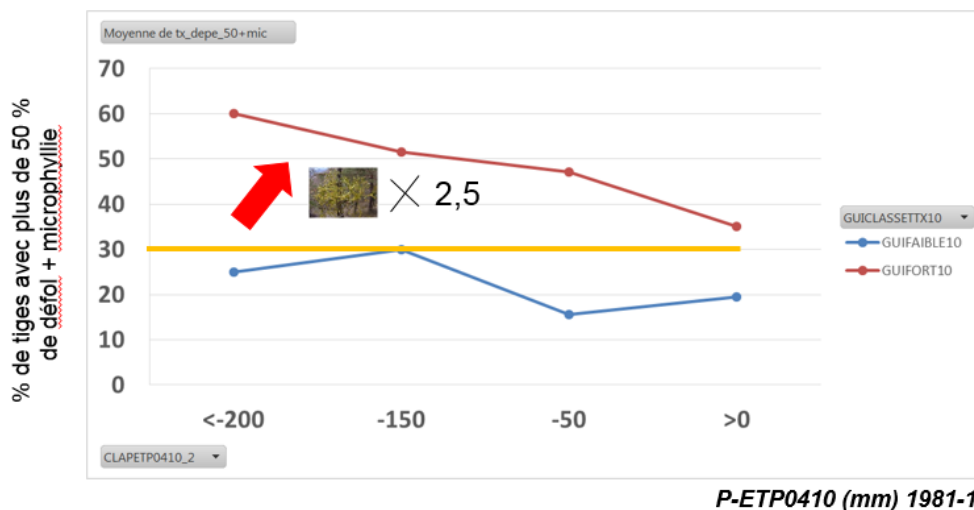
L'indice prédictif du pourcentage de gui sur une station est donné ci-dessous :

$$\text{Indice gui} = (-0.014 * \text{Alti}) - (2.29 * \text{Confinement}) - (4.21 * \text{Bilan_H2O_position}) - (2.92 * \text{Tmoy12}) - 0.03 * \text{P-ETP0410} + 27.37$$

Dans les zones climatiques où le pin sylvestre est soumis à un fort déficit hydrique et de fortes températures, la probabilité de rencontrer des arbres guités est beaucoup plus élevée. Lorsque le P-ETP d'avril à octobre est inférieur à -200 mm, il y a 60% de chance de rencontrer des arbres avec plus de 10% du houppier fonctionnel touché par du gui. Cette probabilité est de 10 % lorsque le même P-ETP est positif.



Pourcentage de placettes affectées par du gui selon le bilan hydrique d'avril à octobre, pour un taux de gui faible (recouvrement dans les houppiers <10%) et un taux de gui fort (recouvrement >10%)



Pourcentage de tiges avec plus de 50% de déficit foliaire, selon le bilan hydrique climatique d'avril à octobre, pour des taux de gui faible (recouvrement dans les houppiers <10%) et fort (recouvrement >10%)
La barre jaune représente le seuil des placettes ayant plus de 30 % de tiges avec plus de 50 % de défoliation (placettes jugées dépérissantes « au seuil de 30% »).

Dans les classes de P-ETP d'avril à octobre les plus déficitaires (< -200 mm), le pourcentage de tiges avec plus de 50% de déficit foliaire est de 25 % si le gui est peu présent et de 60 % si le gui est très présent. Lorsque le même bilan hydrique est supérieur à 0, le pourcentage de tiges dépérissantes est de 35 % quand la présence de gui est jugée forte contre 20 % lorsque que le gui est peu présent. Dès que le gui est présent à un seuil supérieur à 10 % dans le houppier, une très grande majorité des placettes sont dépérissantes. Plus le déficit hydrique climatique augmente plus l'impact de celui-ci sur le dépérissement augmente. Pour les P-ETP les plus faibles, à savoir < -200 mm, il y a deux 2.5 fois plus de tiges dépérissantes dans les placettes fortement affectées par du gui contre 1.7 dans les zones où le P-ETP0410 est supérieure à 0.

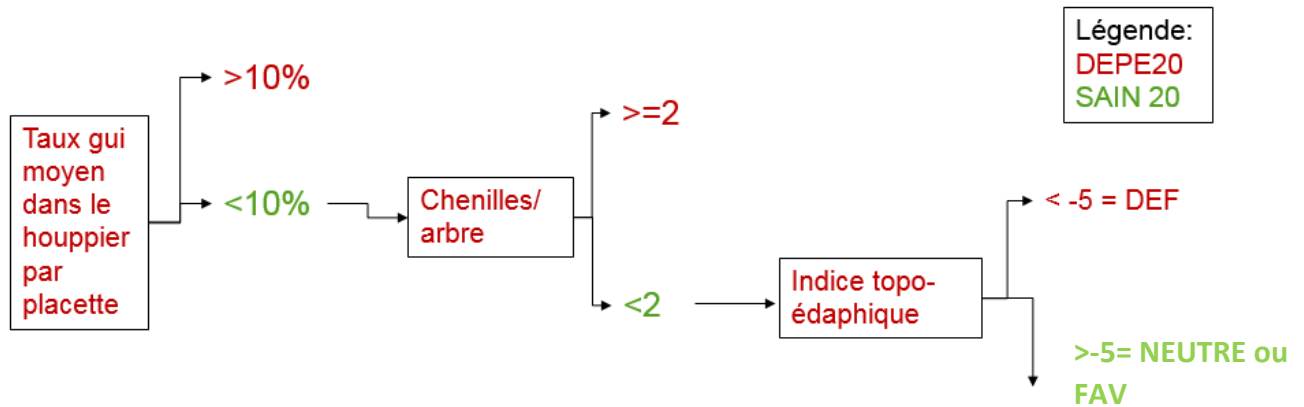
Le gui explique une grande partie du dépérissement du pin sylvestre en PACA et sa présence est expliquée par des critères climatiques et hydriques. Comme le soulignent les travaux de Dobbertin et Rigling (2006), il est probable que « le gui agisse comme un facteur prédisposant au dépérissement voire à la mortalité des arbres en augmentant la perte d'aiguilles après la sécheresse, et en facteur contribuant en augmentant le stress hydrique pendant la sécheresse ». Dit autrement, le gui limite la bonne vitalité de l'arbre en agissant

sur la quantité d'aiguilles vivantes et, lors des sécheresses marquées, il accentue leurs conséquences en s'alimentant aux dépens de l'arbre infecté. Là où il y a du gui, si les à-coups climatiques sont marqués, le risque de dépérissement est donc accru. C'est en ce sens qu'il intervient directement en tant que facteur prédisposant et aggravant. À l'inverse lorsque les conditions climatiques redeviennent plus favorables, l'arbre reconstruit son houppier à la défaveur du gui qui rentre en latence. De nombreuses études ont montré que la probabilité de mortalité des arbres augmente avec le niveau d'infection par le gui (Cailleret 2011, Couvin 2015, Gravier 2011).

A partir d'analyses en arbre de segmentation de type C4.5, nous présentons deux clefs de détermination permettant d'expliquer :

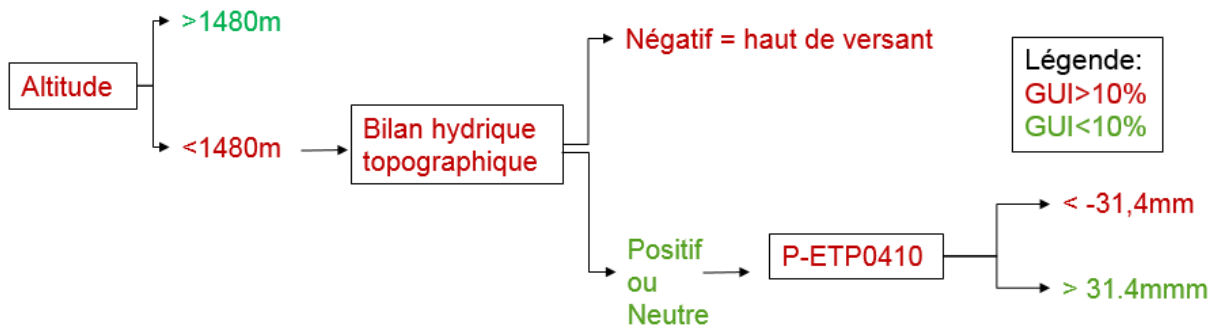
- la présence de placettes ayant plus de 20% de tiges avec plus de 50% de défoliation ;
- la présence forte du gui sur la placette c'est-à-dire un taux moyen d'occupation du volume du houppier $\geq 10\%$ (GUI $> 10\%$).

Ces deux clés reprennent des variables similaires des modèles gui et dépérissement présentés précédemment.



Cle de détermination de présence des placettes jugées dépérissantes au seuil de 20% (plus de 20% des tiges ayant plus de 50% de défoliation). Taux de bon classement : 80%

La couleur rouge indique les placettes jugées dépérissantes, la couleur verte les saines (par exemple une placette est dépérissante si le taux de gui est $> 10\%$ ou si le taux de gui est $< 10\%$ et que le nombre moyen de nids de chenilles par arbre est > 2 , etc.)



Cle de détermination de présence du gui à un seuil pouvant provoquer des dépérissements (soit le seuil de 10% pour le taux moyen de recouvrement de gui dans les houppiers). Taux de bon classement : 69%

La couleur rouge indique les placettes ayant plus de 10% de gui, les vertes celles ayant moins de 10% de gui (par exemple, le gui est peu présent pour les placettes situées à plus de 1480m, il est très présent pour les placettes situées à moins de 1480m ayant un bilan hydrique négatif, etc).

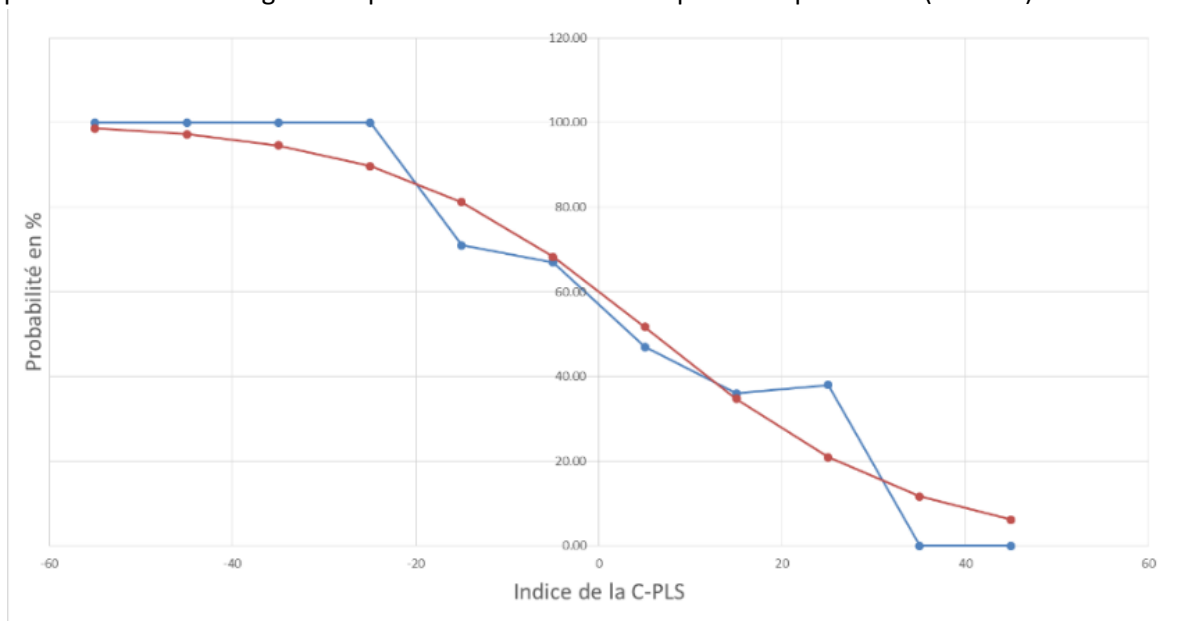
Carte de vigilance climatique et indice climat-sol

Pour établir la carte de vigilance climatique, la variable binaire retenue pour caractériser le dépérissement est l'absence ou présence de dépérissement au seuil de 30



% : une placette présente des signes de dépérissement si plus de 30 % des tiges de la placette ont un déficit foliaire >50 % (microphyllie comprise).

La régression logistique et l'analyse discriminante linéaire C-PLS sont les analyses statistiques utilisées pour établir la carte de vigilance climatique. L'équation de la C-PLS a été établie en retenant les variables les plus significatives dans l'explication de la présence ou non de dépérissement, c'est-à-dire les variables ayant un VIP (variable importance in projection) supérieur à 0,8. Puis, une régression logistique a été modélisée pour relier l'indice de la C-PLS avec la probabilité de présence de dépérissement. Cette régression présente une très bonne qualité de prédiction ($R^2=0.95$).



Prédiction de la présence ou de l'absence de dépérissement sur une placette (le dépérissement étant défini ici par la présence de plus de 30 % de tiges avec plus de 50% de défoliation)

La courbe bleue représente le taux de dépérissement en fonction de l'indice de la C-PLS établi sur les 90 placettes de mesures. La courbe orange représente la probabilité de rencontrer une placette dépérissante ; elle correspond à la régression logistique établie sur l'indice de la C-PLS.

Les deux variables principales qui ressortent pour expliquer le dépérissement sont :

- le taux d'infestation moyen des houppiers par le gui (VIP=1,07) ;
- l'indice topoédaphique (VIP=0,93).¹

Plus le taux d'infestation du gui est élevé, plus l'indice de la C-PLS est faible et plus la probabilité de dépérissement est élevée. Il en est de même pour l'indice topo-édaphique : plus il est défavorable, plus la probabilité de dépérissement est forte.

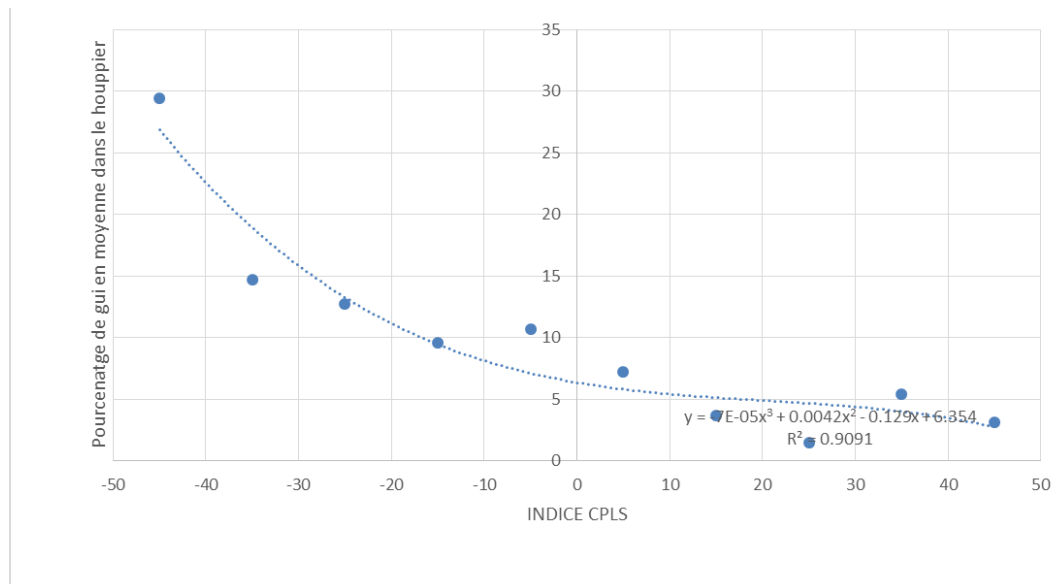
L'indice topoédaphique est une donnée non cartographiable qui doit être mesurée sur le terrain puisqu'elle fait intervenir des données liées au sol comme la réserve utile, la texture, le pendage de la roche, etc. Il ne peut donc pas être utilisé directement pour établir la carte de vigilance.

Par contre, la présence de gui est une donnée cartographiable puisqu'elle fait intervenir des données liées au climat (voir précédemment le modèle établi pour expliquer la présence du gui). Nous avons alors réalisé un modèle permettant d'établir, par la technique C-PLS, les placettes fortement infectées par le gui. La variable binaire retenu est l'absence ou présence de gui au seuil de 10% : une placette est considérée comme fortement gütée à partir d'un taux de présence du gui dans le houppier supérieur à

¹ Le taux de chenille processionnaire ne ressort pas dans cette analyse statistique, contrairement à la régression logistique.



10 %. Ce seuil de 10% a été choisi suite aux analyses conduites précédemment (voir partie précédente sur le modèle du gui). L'indice de la C-PLS établi a ensuite été mis en lien avec le taux moyen d'infestation du gui dans le houpier.



Prédiction de la présence ou de l'absence d'un taux de gui fort sur une placette (soit un taux de gui > 10% de taux de recouvrement des houppiers)

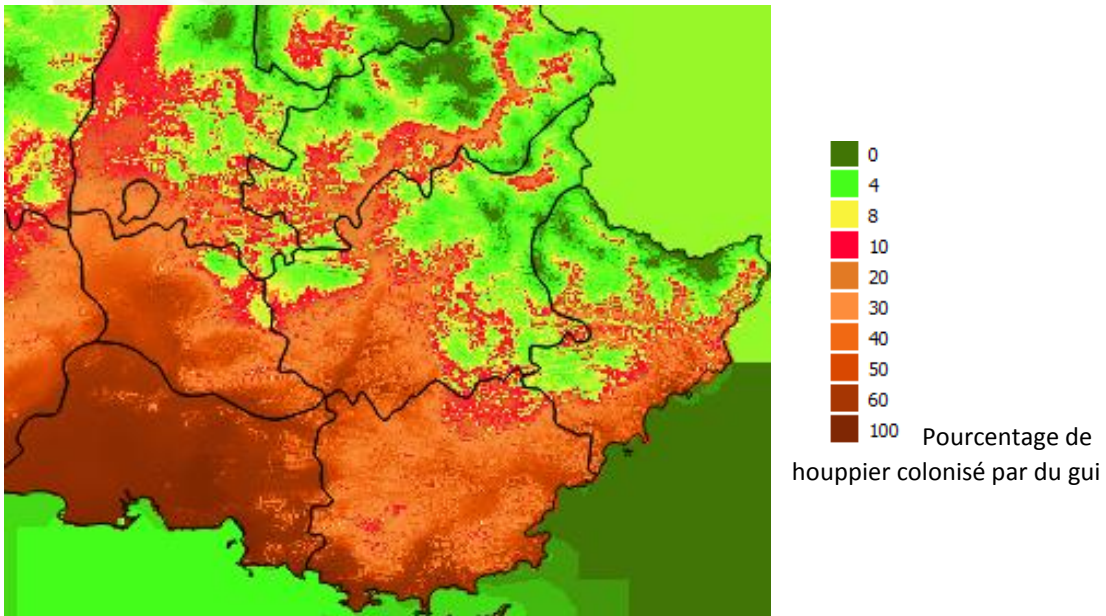
La courbe exprime la relation entre l'indice de la C-PLS (établi pour expliquer la présence ou non d'un taux de gui >10%) et le pourcentage moyen de gui.

Les variables qui ressortent pour expliquer la présence du gui sont :

- le bilan hydrique climatique P-ETP d'avril à octobre, issu du modèle climatique AURITALIS (VIP=1,18),
- le bilan hydrique climatique P-ETP annuel, issu aussi du modèle AURITALIS (VIP=0,93),
- la récurrence de déficit hydrique climatique pour le pin sylvestre établie à partir de l'étude dendrochronologique (VIP=0,84),
- le TPI, indice de position topographique établi à partir du MNT (voir définition en partie « méthode »)(VIP=0,76).

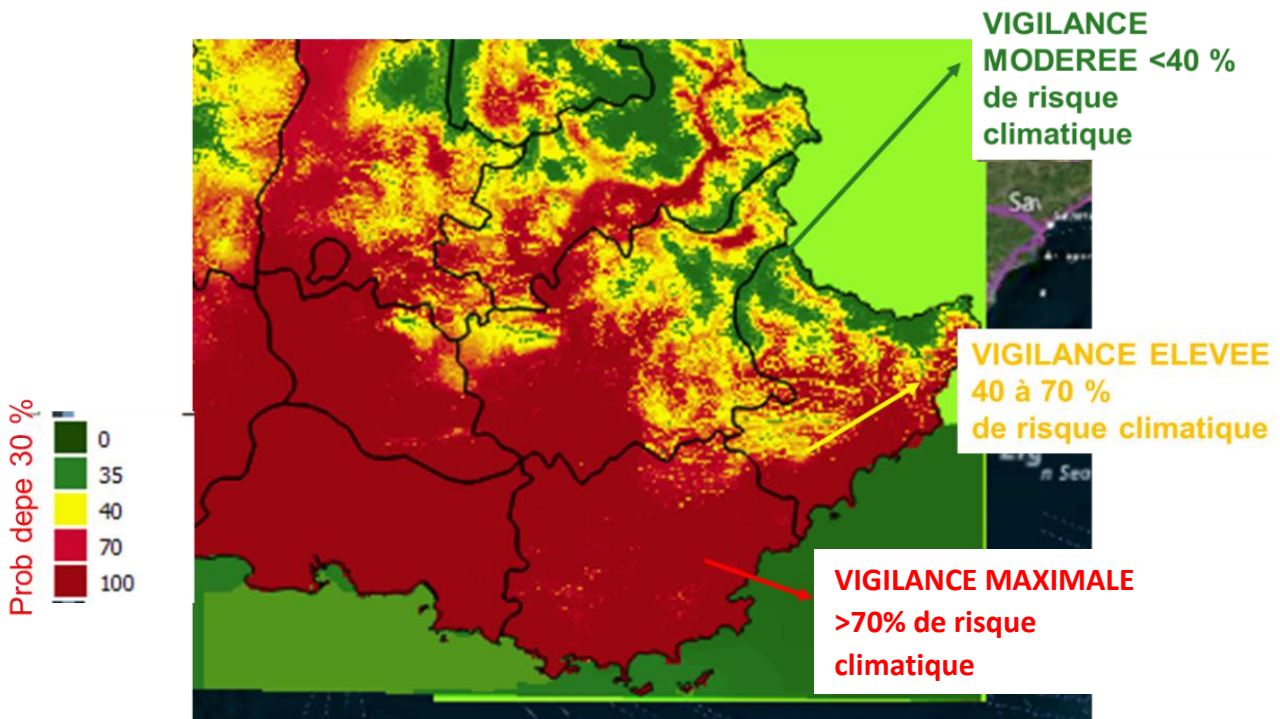
Les bilans hydriques climatiques et le TPI sont cartographiables. Ainsi, les données climatiques AURITALIS et le MNT nous ont permis de tracer la carte de présence de gui ci-dessous, exprimée en % de gui dans le houpier (moyenne par placette).





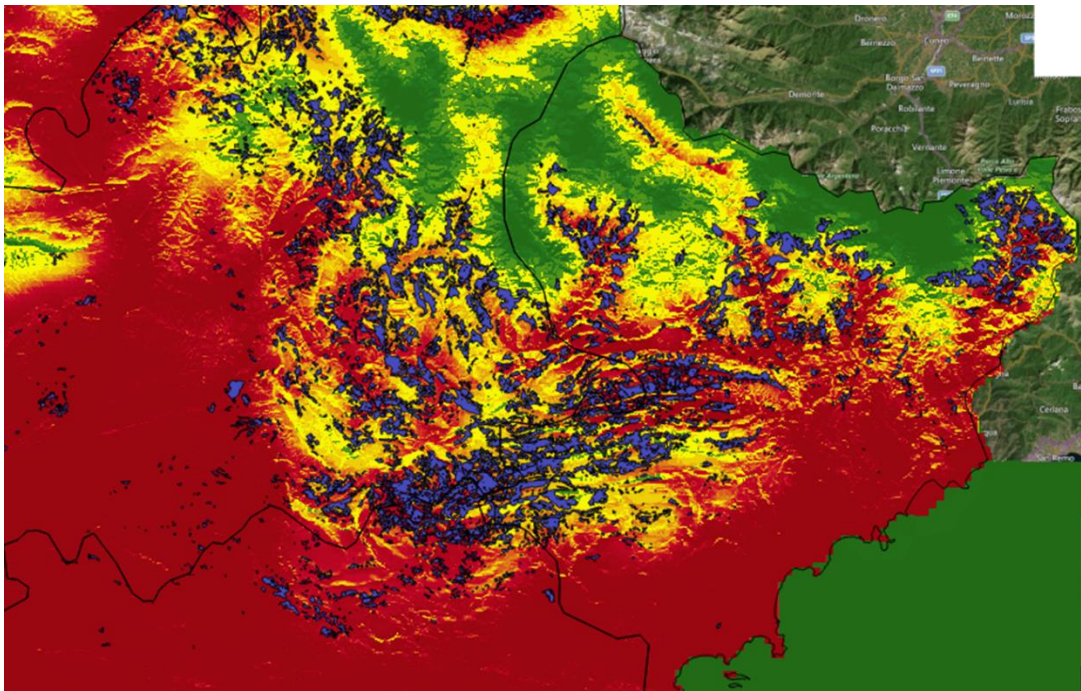
Carte modélisant le pourcentage moyen des houppiers colonisés par du gui

Le gui moyen modélisé, en postulant un indice topo-édaphique nul, c'est-à-dire n'aggravant ou ne compensant pas le climat, il est possible d'établir la carte de vigilance climatique du pin sylvestre en PACA. Cette carte de vigilance renvoie ainsi uniquement des niveaux de vigilance climatique (vu qu'elle n'intègre pas les données stationnelles).



Carte de vigilance climatique BIOCLIMSOL définissant le risque de dépérissement du pin sylvestre (le dépérissement étant 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%. La vigilance climatique est dite modérée si cette probabilité est <40%, élevée pour une probabilité comprise entre 40 et 70%, et maximale pour les probabilités >70%.





Carte de vigilance climatique zoommée sur la zone d'étude et comparée à la présence du pin sylvestre (les zones bleues représentent les peuplements à dominance de pin sylvestre d'après la BDFORET de l'IGN).

Cette carte montre :

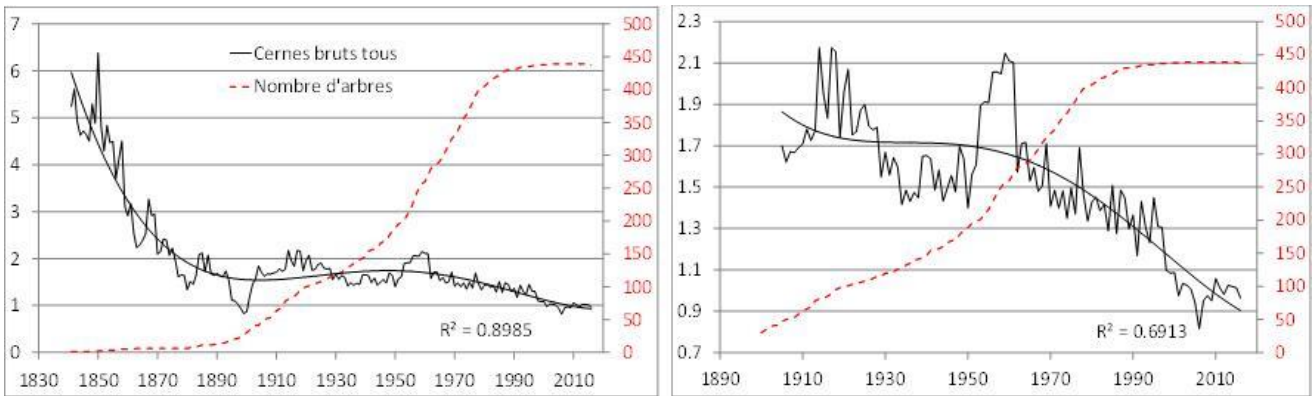
- que le pin sylvestre est majoritairement présent dans les zones de vigilance élevée
- qu'il est peu présent dans les zones de vigilance maximale (qui correspondent aux basses altitudes) et de vigilance faible (qui correspondent aux hautes altitudes).

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

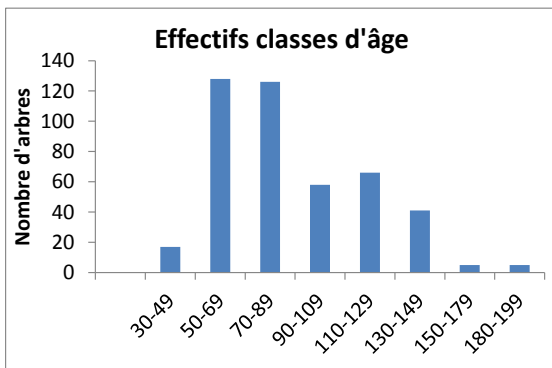


Résultats issus des données dendroécologiques

Séries moyennes pour les cernes bruts et indicés



Evolution de la largeur des cernes bruts tous arbres confondus depuis 1840 et 1900



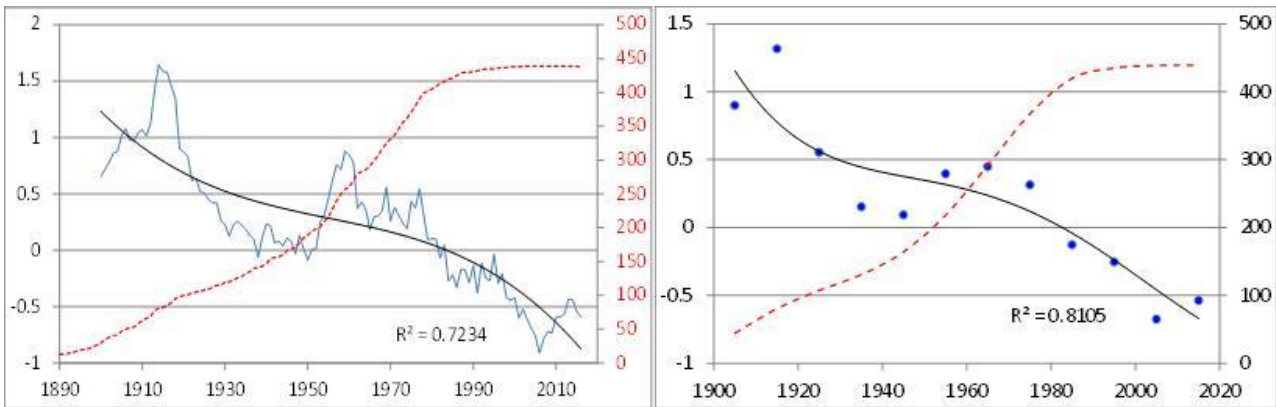
Nombre d'arbres par classe d'âge

Le nombre d'arbres est trop limité avant 1900 pour faire des statistiques. Les différences entre individus sont très importantes, notamment pour les 3 plus vieux (>180 ans) qui présentent une croissance très supérieure à la moyenne. L'entrée continue de nouvelles séries plus jeunes, donc avec des cernes plus larges (cf. plus loin cernes/âge) et sans doute un effet climatique favorable,

maintient une moyenne assez haute jusqu'en 1970. On observe ensuite une baisse continue de tendance, avec d'une part la fin progressive des entrées de nouvelles séries, accentuée par un "accident" majeur entre 1998 et 2007, suivi d'une reprise partielle qui ramène la largeur moyenne dans la tendance précédente.

Ces courbes sont en partie biaisées, car les variations sont accentuées par les arbres ayant les plus fortes croissances. Nous avons pour cela indexé les séries afin de donner le même poids aux variations de tous les arbres quel que soit leur niveau de croissance.

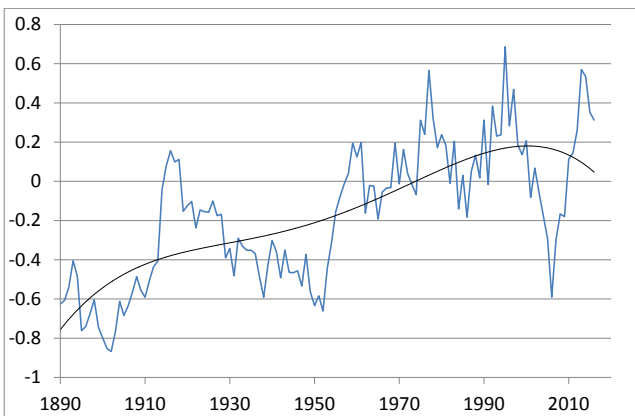
Evolution de la largeur des cernes indicés depuis 1900: valeurs annuelles et décennales



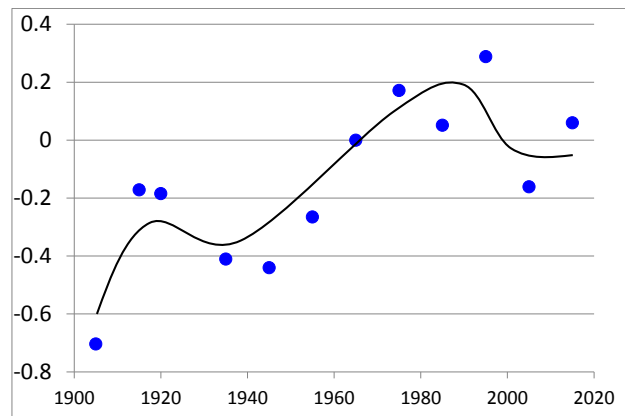
L'indexation amène quelques nuances: pour les largeurs de cernes, elle limite la variabilité interannuelle, réduit l'importance relative du pic suivant les années 50, et montre un décrochage net au début des années 80. Ce décrochage peut correspondre à l'arrêt des entrées de nouvelles séries jeunes, mais en même temps



il coïncide avec des années difficiles débutant en 1979 : sécheresses de 1979 et 82, froid des années 85 à 87,. Les indices montrent une résilience plus lente après le creux absolu de 2006. Le fort rebond de croissance observé entre 1950 et 1960 correspond en partie à une entrée massive de séries jeunes. Etant visible sur de nombreux arbres âgés un peu partout dans la zone d'étude, il est dû aussi à des éclaircies pratiquées après la guerre et sans doute au réchauffement climatique comme il sera montré plus loin. Les séries montrent enfin un nombre important de baisses fortes et brusques de croissance à la fin des années 40, en 1952 et en 1962. Cela est peut-être dû à des accidents (neige, verglas ?) qui auraient pratiqué cette éclaircie naturellement par endroits et favorisé le rebond des moins touchés, libérés de la concurrence des voisins les plus cassés. Cette éclaircie naturelle après l'accident de 1949-52 contribue au fort rebond des



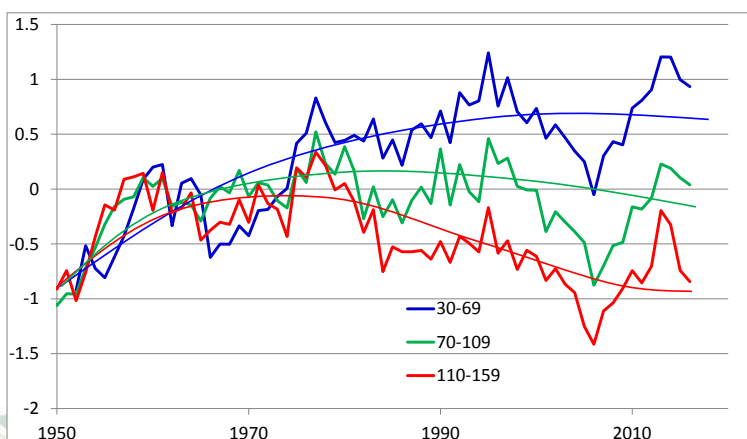
années 50, qui est donc sans doute multifactoriel.



Evolution de la surface moyenne des cernes indicés depuis 1900: valeurs annuelles et décennales

La surface des cernes est plus proche de la productivité forestière que la largeur de cernes. On constate qu'elle a fortement progressé en moyenne durant les deux premiers tiers du 20^{ème} siècle, s'est stabilisée entre 1970 et 1990 pour ensuite s'effondrer jusqu'en 2006. Une reprise s'est produite entre 2007 et 2014. Cette tendance générale est largement alimentée par l'arrivée continue de peuplements jeunes et productifs entre 1900 et 1980. Elle masque des disparités fortes entre classes d'âge:

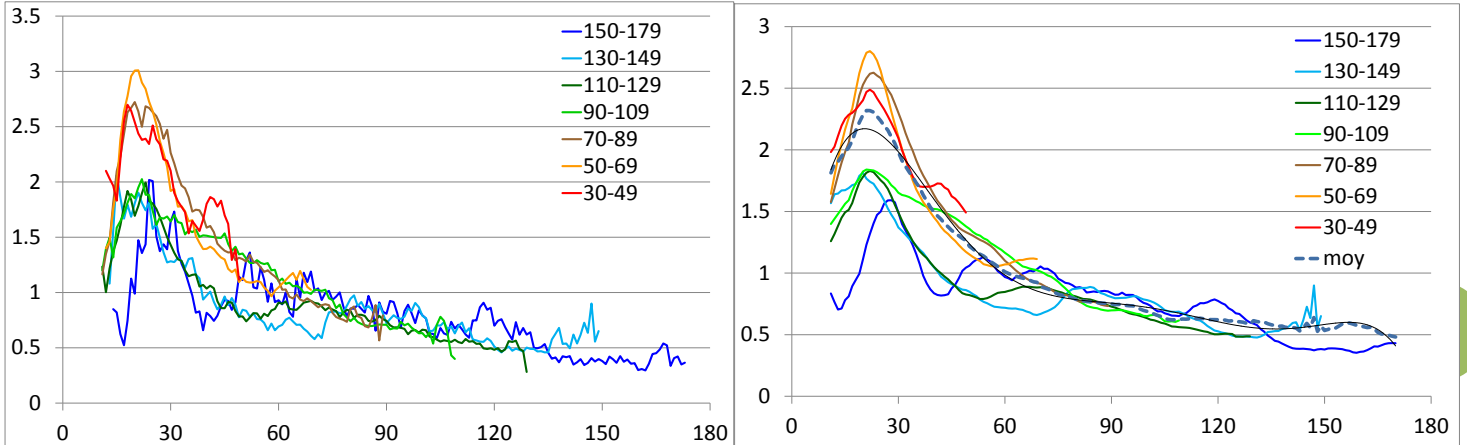
- (1) les arbres jeunes ont gagné continuellement en productivité entre 1950 et 1990 avant de se stabiliser, en tenant compte cependant du creux marqué entre 1990 et 2010, après lequel ils ont retrouvé leur niveau maximum des années 90.
- (2) les classes intermédiaires ont progressé de 1950 jusqu'aux années 70, puis ont stagné jusqu'aux années 90, ont marqué le même creux jusqu'en 2010, puis rebondi, mais sans retrouver leur niveau antérieur.
- (3) les vieux arbres n'ont progressé que dans les années 50, puis leur productivité s'est stabilisée jusqu'aux années 70. Elle a ensuite décliné dès les années 80 avec le même creux que les autres classes entre 1990 et 2010. Ils ont retrouvé très fugacement en 2013-14 leur niveau, déjà faible, des années 90,



mais pas leur maximum des années 70, puis ont replongé fortement au cours des 2 dernières années.

Evolution de la surface indicée des cernes par classes d'âge (voir aussi plus loin l'évolution des largeurs de cernes par classes d'âge plus détaillées).

Décroissance naturelle des cernes avec l'âge

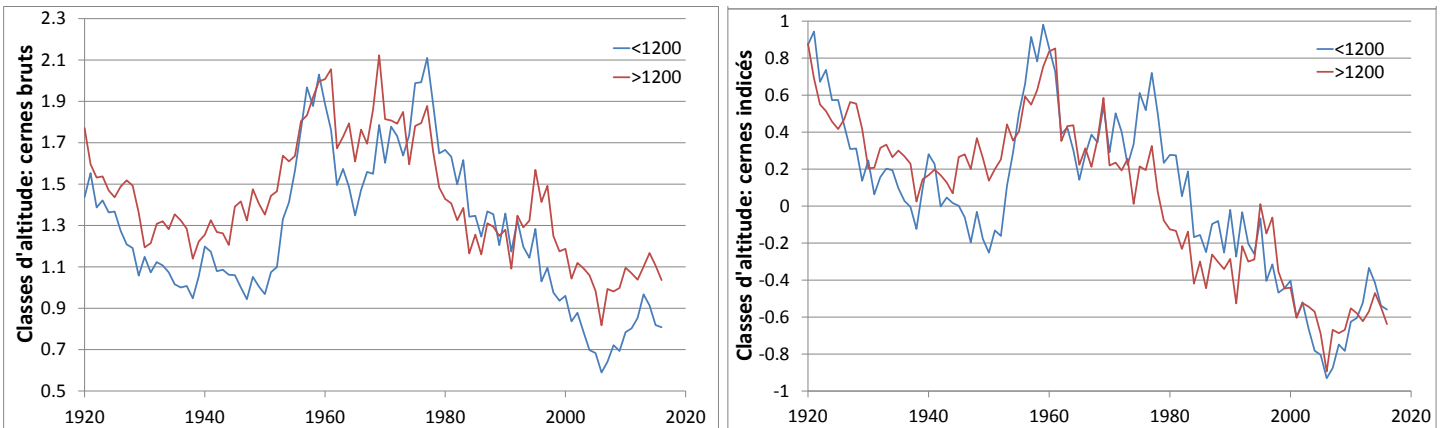


Largeurs de cernes en fonction de la classe d'âge,

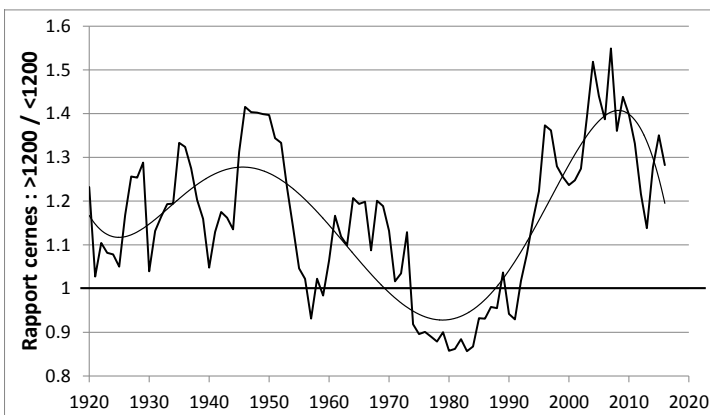
brut (à gauche) et lissé sur 10 ans (à droite).

La courbe moyenne correspond à la « loi biologique » du pin sylvestre. Il est normal que les cernes décroissent en largeur avec l'âge, dans des conditions habituelles de densité. Les variations autour de cette courbe correspondent à des effets du climat et du changement global. Cette tendance doit donc être enlevée aux courbes de croissance des classes d'âge pour étudier l'effet du climat. Cette loi biologique de largeur de cerne peut être transformée en loi biologique de productivité des peuplements.

Croissance selon l'altitude



Cernes de croissance en fonction des deux classes d'altitude (>1200m / <1200m), bruts à gauche, indicés à droites



Ratio des cernes entre hautes (>1200m) et basses altitudes (<1200m)



Après 2010, et au-dessus de 1200 m, les cernes présentent des valeurs inférieures mais assez proches (-12%) des valeurs des années 80. En dessous de 1200 m, on a plus perdu en proportion depuis les années 80 (-34%). Les hautes altitudes ont résisté plus longtemps à la descente aux enfers de 2003-2007, avant de céder autant en 2006, puis ont été plus rapidement et fortement résilientes en 2007 et 2008.

Toutefois, comme le montrent les cernes indicés, si on démarre en 1920, et en considérant que les deux courbes se suivent assez fidèlement jusqu'au début des années 40, les deux classes d'altitude ont subi les mêmes variations générales de croissance, avec les mêmes amplitudes décennales malgré des hauts et des bas décalés dans le temps.

La remontée spectaculaire des basses altitudes dans les années 50 n'est pas due à des entrées massives de nouvelles séries, car en proportion elles sont plus nombreuses au-dessus de 1200m qu'en dessous (18% contre 14%). Il en est de même pour le fort gain de croissance des basses altitudes entre 1977 et 1991.

Ceci peut être dû à un effet climatique: l'allongement de la saison de végétation permettant un démarrage très précoce au printemps, et surtout un polycyclisme marqué en automne à basse altitude, durant des années encore fraîches qui réduisent cet avantage en haute altitude. La présence de cernes polycycliques dans cette période est en effet très marquée. Cependant le gain est trop rapide dans les années 50 pour être dû seulement au climat. On a plus probablement l'effet d'éclaircies qui auraient été effectuées dans les peuplements. Cet effet d'éclaircie pourrait aussi être dû (en partie) à un événement climatique se traduisant par des mortalités ou des pertes fortes de houppiers de certains arbres (disparus depuis ou passés dans l'étage dominé). On remarque en effet sur de nombreuses séries un accident très marqué de croissance en 1949-1950 : on peut formuler l'hypothèse d'une casse de neige.

Les hautes altitudes décrochent brutalement en 1974. L'écart entre haute et basse altitude se réduit progressivement à partir de 1985 pour s'annuler en 1992.

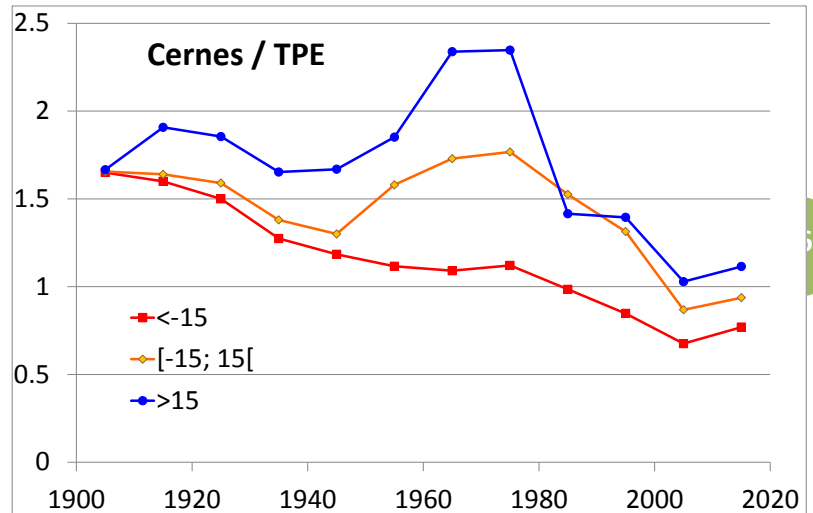
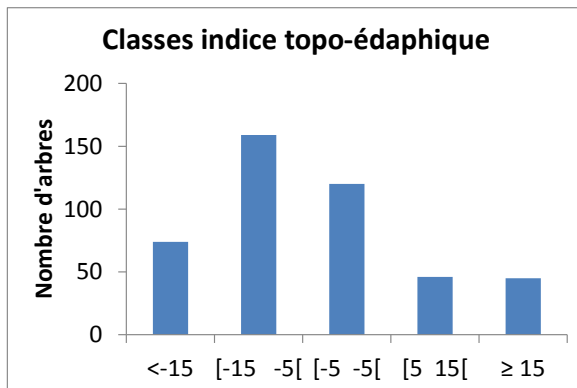
On observe exactement le même phénomène de décrochement brutal en 1993-94, mais cette fois dans la série de basse altitude, qui suivra ensuite la série haute de façon parallèle jusqu'en 2016, en conservant l'écart de départ, sans récupérer. Ce décrochement pourrait être lié aux attaques de chenilles (1991-93 = grosse culmination). Il y a aussi dans la série de basse altitude des décrochements anciens réguliers qui pourraient être dus à des attaques de chenilles processionnaires : 1926, 1933 (+7), 1941 (+8). Dans ces années fraîches, et même froides pour la décennie 40, les chenilles ont pu proliférer beaucoup plus à basse altitude. Le climat s'étant significativement réchauffé récemment, notamment les minimums d'hiver, avec disparition des périodes de grand gel, la limite altitudinale pour les chenilles est beaucoup remontée. En 2015-2016, dans notre échantillon de placettes, les chenilles sont deux fois plus fréquentes (40% contre 23% des arbres) et trois fois plus nombreuses (1.55 contre 0.44 nids/arbre) au-dessus de 1200m.

Pour conclure, il y a clairement une perte relative prolongée à basse altitude : mais les mortalités plus nombreuses y ont contribué à éclaircir les peuplements, et favorisé, après une période de récupération, une croissance en diamètre accélérée des survivants.

Croissance selon l'indice topo-édaphique

Plus de la moitié des placettes (53%) se situe dans les classes de faible fertilité (indice<-5), pour seulement 27% en fertilité moyenne (-5 à 5) et 20% dans les bonnes fertilités (> 5). Cette dominante de faible fertilité correspond bien à la réalité de terrain, avec des sols en moyenne peu profonds et rocheux, à forte proportion d'éléments grossiers.



Nombre d'arbres par classes d'indice topo-édaphique*Cernes de croissance selon l'indice topédaphique*

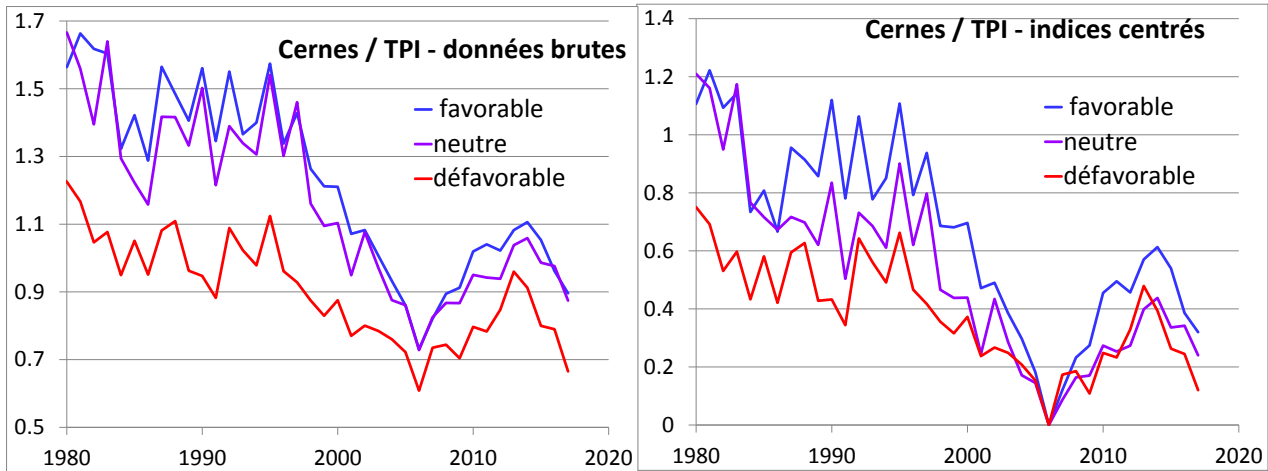
La croissance du pin sylvestre au début du 20^{ème} siècle semblait indifférente aux conditions stationnelles. Il y a cependant dans ce constat des biais liés à l'âge des peuplements dans ces différentes conditions de station, et à la distribution altitudinales de ces conditions de station, qu'il faudrait mieux étudier.

Par la suite, jusqu'en 1940, on note un maintien de la croissance pour les meilleures classes de fertilité et un décrochement pour les stations moyennes et mauvaises. Puis, dans les années 50 à 70, un fort rebond de croissance se produit dans les bonnes et moyennes fertilités, mais pas sur les mauvaises. A partir des années 80, les bonnes fertilités voient leur croissance s'effondrer pour retomber au niveau des moyennes jusque dans les années 2000. En valeurs relatives, les bonnes et moyennes fertilité perdent alors beaucoup plus que les mauvaises, qui poursuivent leur décroissance faible mais régulière. Au cours de la dernière décennie, la hiérarchie des stations se rétablit, mais avec des différences bien plus faibles qu'au milieu du 20^{ème} siècle.

On peut voir dans ces variations relatives les effets du changement global : il a favorisé largement les meilleures stations, et de façon plus limitée les moyennes, grâce à l'allongement de la saison de végétation et l'augmentation du taux de CO₂, entre les années 40 et 80. Les conditions stationnelles compensaient alors entièrement les déficits climatiques occasionnels (sécheresses) même les plus forts de l'époque. Puis avec le réchauffement et des sécheresses de plus en plus marquées et longues, ces conditions n'ont plus compensé les déficits hydriques des années extrêmes: les arbres des meilleures stations, qui n'étaient pas du tout habitués à être en situation de stress hydrique, ont plus souffert que ceux des mauvaises stations, habitués et développés pour résister à ces stress.

On note que la résilience en valeurs absolues a été similaire sur toutes les stations après 2006, mais qu'elle a été moins bonne en valeurs relatives sur les meilleures et les moyennes stations, qui sont loin d'avoir récupéré en 2016 leurs valeurs des années 80 et 90.

Croissance selon la topographie (le TPI)



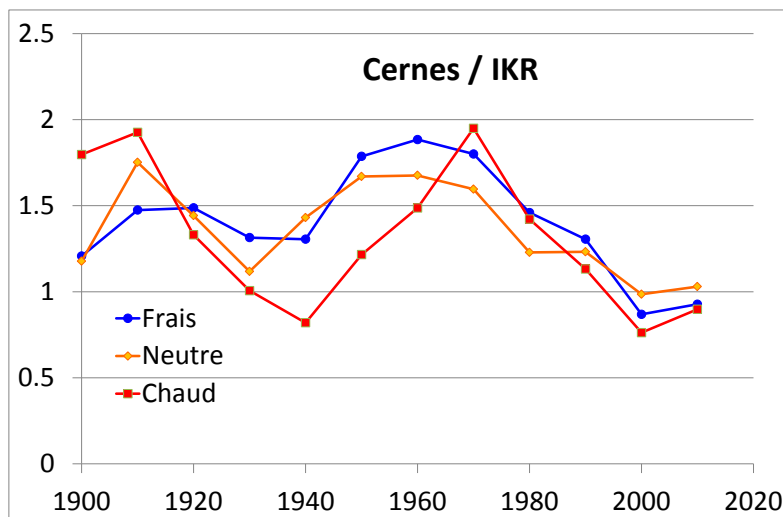
Cerns de croissance selon le TPI (données brutes et indicées)

La croissance absolue (données brutes) est beaucoup plus faible en haut de pente et en crête (zones défavorables) que partout ailleurs. Elle est en moyenne peu différente entre les situations neutres (milieux de versant et zones plates) et celles favorables (bas de versant).

Les valeurs indicées et centrées apportent des informations supplémentaires. Par rapport aux valeurs moyennes depuis 1900, les positions défavorables confirment, dès le début des années 80, un déficit significatif par rapport aux autres positions: la croissance a donc commencé à y ralentir depuis plus longtemps. Les situations neutres décrochent à partir du milieu des années 80 par rapport aux zones favorables. Elles gardent ce handicap jusqu'à présent, et n'ont pas été en moyenne plus résilientes que les hauts de pentes et crêtes après 2006. La hiérarchie des trois classes de TPI s'affirme de nouveau au cours des dernières années (2014-2016) avec l'effet des sécheresses marquées qui a plus impacté les positions défavorables.

Les bas de pente ont plus longtemps résisté et plus rapidement récupéré que les autres zones, ce qui a mieux préservé leur productivité.

Croissance selon l'IKR

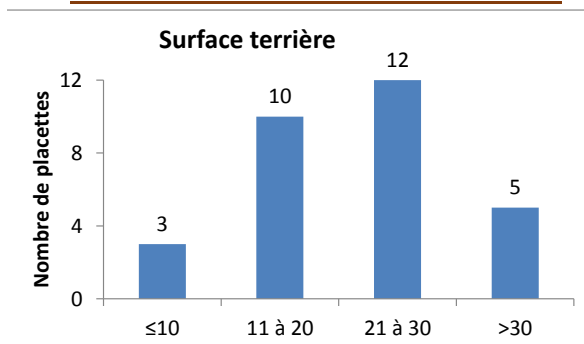


Cerns de croissance selon l'IKR (indice lié à la pente et à l'exposition)



La croissance suit avec l'exposition une tendance qui ressemble beaucoup à ce qu'on détecte avec l'altitude, si on exclut les variations et valeurs autour de 1900 où le nombre de donnée est réduit. Comme pour les basses altitudes (<1200m) plus chaudes par rapport à celles supérieure à 1200m, les expositions chaudes avaient une croissance proche des plus fraîches au début du 21^{ème} siècle, puis ont perdu en croissance absolue et relative jusque dans les années 40, ont fortement accéléré dans les années 50 rattrapant progressivement leur retard et dépassant même légèrement les fraîches dans les années 70, avant de décroître plus rapidement dans les années 80 à 2000. On a ainsi une confirmation des effets de la température qui joue différemment suivant que cette contrainte est ancienne ou récente pour les arbres, avec exactement la même analyse des effets d'abord favorables puis défavorables du changement climatique dans les situations habituellement chaudes. Les expositions neutres suivent une voie intermédiaire, et finissent même mieux que les autres. Elles ne subissent pas les conditions extrêmes de chaleur des expositions chaudes, mais leurs peuplements adultes sont cependant habitués depuis longtemps à supporter épisodiquement des périodes de stress, donc ont pu moins subir les conséquences des dernières années extrêmes que les arbres des milieux les plus frais.

Croissance selon la surface terrière G



La relation entre la surface terrière et la croissance est assez complexe. Elle traduit des interactions fortes entre surface terrière, station, compétition et mortalité. Elle montre aussi un déséquilibre de l'échantillon dans certaines classes, donnant dans le passé des variations très brusques qui sont spécifiques à quelques placettes.

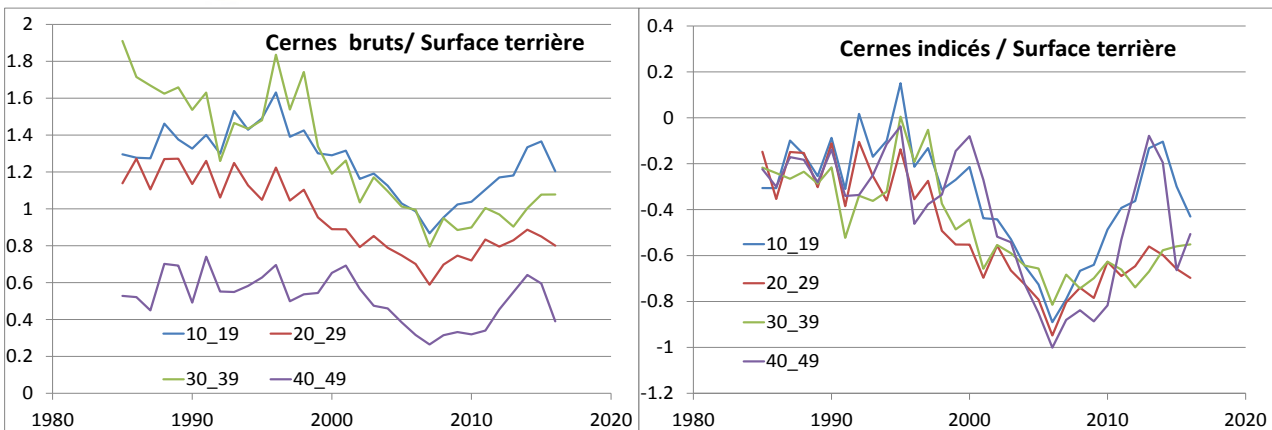
Nombre de placettes par classe de surface terrière

Dans les figures présentées ici ces variations ne sont pas montrées.

On a logiquement une meilleure croissance en diamètre des arbres dans les peuplements les moins denses par rapport aux plus denses. Les deux extrêmes sont donc respectés. Par contre on a entre les deux classes intermédiaires une inversion de courbes par rapport à la logique de compétition entre arbres.

Les deux classes de densité extrêmes sont à la fois :

- (1) les plus longtemps résistantes durant la phase de décroissance forte de 1990 à 2006 (elles ne plongent que 5 ans après les deux classes intermédiaires)
- (2) celles qui perdent le plus en valeurs relatives au moment du creux de 2006,
- (3) les plus résilientes après 2006 et jusqu'en 2014
- (4) les moins résistantes lors des derniers gros stress (2015-2016)



Cernes de croissance selon la surface terrière (données brutes et indicées)

On peut expliquer ces nuances de la façon suivante:

Les peuplements les plus denses ($G > 40$) sont tous sur des sites favorables permettant des fortes productions. La croissance de chaque arbre est lente à cause de la compétition intense. Ces bonnes conditions de milieu (station ou altitude/exposition) a permis leur résistance dans les années 90, en compensant largement les déficits hydriques de l'époque. Mais les conditions extrêmes du milieu des années 2000 ont rendu la compétition entre eux féroce, d'où la chute de croissance forte. Ils ont cependant eu peu de mortalité, grâce aux conditions favorables. Avec le retour en 2008 de conditions favorables, les conditions locales ont permis une reprise rapide de la croissance en relatif. La forte compétition entraîne de nouveau une forte décroissance en 2015-2016 avec la sécheresse marquée.

Les sites de faible surface terrière ($G = 10$ à 19) correspondent à des sites moyennement fertiles. Leur croissance était initialement forte grâce à la combinaison d'une potentialité convenable et d'une densité initiale moyenne. Elle a bien résisté dans les années 90 faute de compétition intense, mais au cours du creux de la crise, entre 2003 et 2007, de nombreux arbres sont malgré tout morts des conditions extrêmes doublées d'une part de compétition. Ces peuplements ont alors eu une reprise de croissance rapide grâce à l'éclaircie réalisée par la mortalité.

La classe 30-39 correspond à des stations plutôt moyennement fertiles, mais où la densité initiale était plus faible que pour la classe 10-19 (d'où des valeurs plus élevées dans les années 80). Ces peuplements combinant une potentialité acceptable avec une densité limitée ont moins souffert que les autres entre 2003 et 2007. Par contre, ce défaut de stress s'est traduit par une faible mortalité, donc une compétition limitée mais continue, d'où la reprise lente de la croissance depuis 2008.

La classe 20-29 correspond à des stations plutôt mauvaises, où la croissance est limitée par la faible potentialité, mais moins contrainte par la compétition. Ces placettes ont décroché plus rapidement et fortement que les autres au début des années 90. Un fort taux de mortalité dû aux conditions extrême, réduisant encore la compétition a cependant permis un rebond de croissance après 2008, qui reste toutefois limité par les conditions locales.

Il y a bien sûr des combinaisons de potentialité et densité qui complexifient cette interprétation, à laquelle on trouve des exceptions, avec notamment des différences en fonction de l'altitude. Mais une des interprétations principales est que la compétition joue un rôle clef, en relation avec le bilan hydrique local, dans la résistance et la résilience des peuplements, et dans le risque de mortalité: dès que les conditions de stations ne sont pas excellentes, une densité forte joue un rôle défavorable à la croissance et à la survie.

Croissance selon la présence de chenille processionnaire

On s'intéresse ici à l'effet immédiat et différé des attaques de chenilles processionnaires sur la croissance des arbres. On part du constat que les arbres perdent d'autant plus de croissance qu'ils ont été fortement attaqués en 2015-2016 lors de la dernière pullulation.

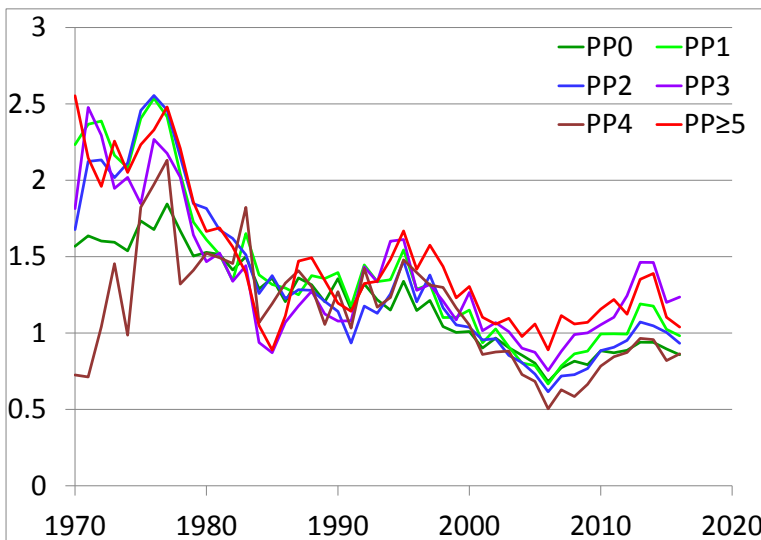
Quantification des attaques de chenilles en 2017

Classe de nombre de nids	0	1	2	3	4	≥ 5
Nombre d'arbres	307	51	28	19	9	25
% d'arbres	70%	12%	6%	4%	2%	6%

Nombre de nids par arbre (répartition en classes)

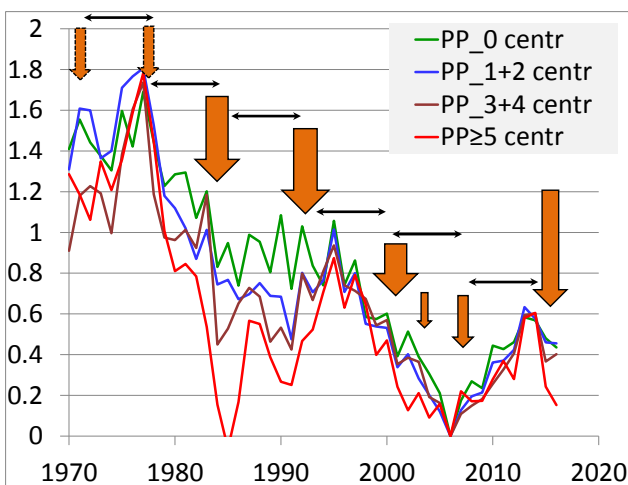
Il y a une grande majorité d'arbres sans nids dans notre échantillon (70%). On a en moyenne 0.92 nids par arbre, soit 92 nids/100 arbres dans la notation DSF. Cette valeur est à comparer aux pires culminations précédentes (voir plus loin) qui atteignaient environ 1/arbre. On a en 2017 passé le pic de culmination (2015-2016), et beaucoup de nids des 2 hivers précédents sont sans doute tombés. La classe "4 nids" est très peu nombreuse et n'est donc pas représentative : on la regroupera dans les analyses avec la classe 3.

Evolution de la croissance en fonction des attaques de chenilles depuis 1970



Cernes bruts moyen par classe de nombre de nids

Les classes 2 à ≥5 sont peu nombreuses, et donc pas forcément représentatives de l'ensemble des milieux. Leur croissance doit donc être normée pour étudier leurs variations. On peut cependant observer quelques tendances. La classe 5+ qui est très au-dessus de la classe 3 avant 2010 passe nettement au-dessous dans les années récentes. Les classes 3 et ≥5 décroissent plus fortement en 2015-2016, années de pullulation, que les classes moins attaquées.



Cernes normés moyen par classe de nombre de nids, centrés sur 2006. Les flèches verticales orange représentent les culminations de chenilles processionnaires (données DSF de 1981 à 2017) : leur longueur est proportionnelle à leur intensité, leur largeur proportionnelle à leur durée. Les deux flèches verticales de gauche sont des extrapolations (culmination supposées) d'après d'une part le temps moyen entre deux épisodes, et d'après les cernes de croissance. Les flèches horizontales ont une amplitude de 7 ans, soit le temps moyen entre deux culminations.

Dans cette représentation, on a centré l'ensemble des séries sur le minimum général de 2006. On montre bien ainsi les effets de résistance à la série d'années les plus sèches (2003-2007) et la résilience de ces séries par la suite. On a aussi normé ces séries sur leur variabilité dans la période 2006-2014, pour faire



ressortir la réaction à la dernière culmination (2015-2016).

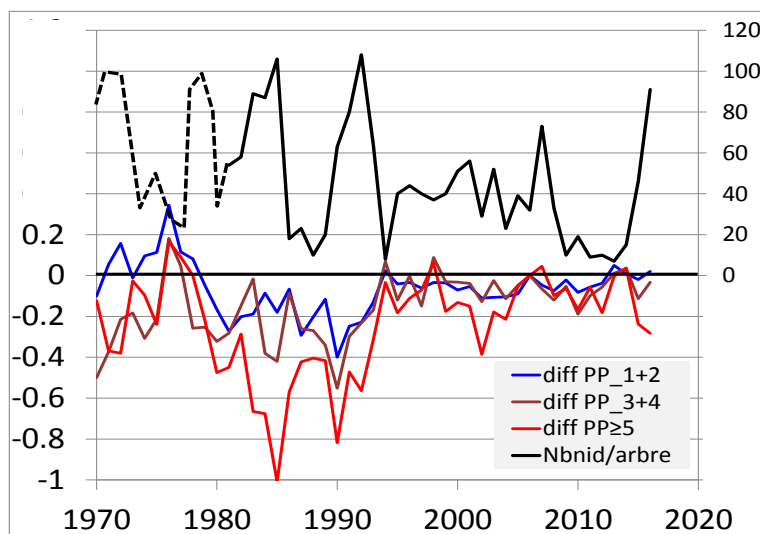
On voit ainsi apparaître 2 phénomènes:

- D'une part l'effondrement en 2015-2016 de la productivité relative des placettes les plus attaquées (≥ 5), mais aussi une perte relative des placettes moyennement attaquées (3-4) par rapport aux placettes peu ou pas attaquées (0 et 1+2).
- D'autre part une réduction systématique des cernes de croissance au moment des culminations précédentes, ou pendant les années suivantes, pour les sites attaqués récemment. Ce qui tendrait à montrer que les chenilles prolifèrent toujours aux mêmes endroits. On retrouve ainsi dans les cernes une réduction de croissance correspondant parfaitement aux culminations supposées d'avant 1981.

Il y a un effet secondaire inattendu (qui reste à vérifier). Les arbres de la classe ≥ 5 ont eu une très bonne résilience de leur croissance lors de la culmination de 2007 par rapport au minimum généralisé de 2006 (alors qu'ils avaient la plus faible croissance relative juste avant). Il n'est pas impossible que la défoliation par les chenilles les ait, paradoxalement, préservés d'une trop forte dessiccation lors de cette année qui a été très sèche. Ils ont par contre souffert dès 2008 d'une nouvelle réduction de croissance, ce qui confirmerait la perte de surface foliaire en 2007, et sont alors repassé derrière les autres classes.

Dans les cernes passés, les zones peu attaquées récemment (1+2) montrent des réductions de croissance significatives au moment des très fortes et longues culminations de 1985 et 1991, mais aussi une petite réduction durable (3ans) avec la culmination de 2001 et une reprise de croissance légèrement plus faible que la classe 0 après la culmination de 2007. Cette faible résilience se remarque jusqu'en 2011, bien que l'écart soit faible. Les cernes des placettes les plus attaquées en 2015-16 (≥ 5) sont quant à eux très fortement réduits en valeurs relatives par rapport à ceux de la classe 0 durant ou après toutes les culminations, la classe 3+4 se situant suivant les cas en position intermédiaire ou similaire à celle de la classe 1+2.

On peut visualiser la perte de productivité des pins sylvestres attaqués par les chenilles en calculant la différence relative entre la série de la classe 0 et chacune des séries des classes 1+2, 3+4 et ≥ 5 . La figure suivante montre cette différence rapportée au nombre de nids relevé par le réseau DSF de 1981 à 2015 et en fonction des culminations plus anciennes de chenilles que l'on peut extrapoler.



Synchronisation entre d'une part les différences relative de largeurs de cernes des arbres attaqués par les chenilles en 2015-2016 et pas attaqués (courbes en couleur du bas, échelle de gauche) et d'autre part le nombre de nids de chenilles (courbe noire en haut, échelle de droite). La valeur 2016 du nombre de nids correspond au comptage sur nos placettes, les valeurs 1980-2015 aux

relevés DSF sur la région. Les valeurs de 1970 à 1980 sont extrapolées à partir des pertes de croissance des cerneaux durant cette même époque. Les séries sont centrées sur 2006.

Pour la culmination (supposée) de 1971-72, la croissance des classes 3+4 et ≥ 5 est restée inférieure à la normale jusqu'en 1975. Toutes les classes attaquées sont ensuite restées constamment sous la normale entre l'attaque de 1978 et celle de 1992, avec des pics négatifs très marqués à chaque culmination et une résilience incomplète entre ces pics. On note que le pic principal, en 1992, de la culmination qui a débuté en 1990 à l'échelle régionale, s'est sans doute produit un peu plus tôt dans nos placettes (1990-91). Ça expliquerait la perte marquée de croissance en 1990, et le retour à la normale en 1994-95 à l'occasion d'une population très basse de chenilles.

Pour les culminations suivantes, qui ont été moins nettes jusqu'en 2014, la perte relative de croissance est moins marquée bien que significative. Cette faible perte est en partie liée aux faibles valeurs des indices de croissance de tous les arbres à partir de 1998, qui empêche d'avoir des variations très fortes entre classes. Il faut donc retenir la tendance plus que la valeur absolue de ces différences d'indice.

Sans doute à cause du réchauffement climatique, il n'y a pas eu de période de très faibles populations de chenilles entre 1996 et 2008, mais des variations faibles autour d'une valeur moyenne et quelques petits pics intermédiaires. Cette longue période de populations moyennes se traduit par une baisse sensible et quasi continue de la classe ≥ 5 , et des valeurs faiblement mais systématiquement négatives des classes 1+2 et 3+4; à l'exception d'un retour très court à la normale à l'occasion du minimum de nombre de nids enregistré vers 2004-2006 et qui se traduit par un mieux en 2005-2006.

On retrouve après la petite culmination de 2007 un cycle normal, bien qu'un peu long, avec une faible population jusqu'en 2014. La faible hausse de 2014 annonce la culmination de 2015-2016, qui se traduit par une perte très importante pour la classe ≥ 5 , moyenne pour la classe 3+4 et faible pour la classe 1+2.

En moyenne, les pertes de croissance sur toute la période 1970-2016 sont de respectivement 7%, 16% et 27% pour les classes 1+2, 3+4 et ≥ 5 par rapport à la classe 0 nids. Elle atteint respectivement 20%, 40% et 80% en moyenne pour les pics de pullulation (fig. suivante) et au maximum 40, 60 et 100%.

Interprétation de la récurrence des pertes de croissance.

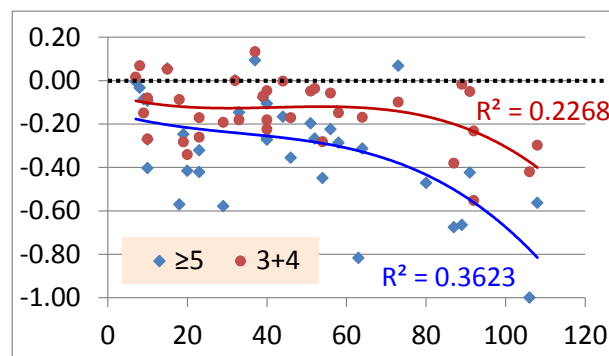
Il est intéressant de montrer que les arbres attaqués durant la culmination 2015-2016 l'ont été systématiquement (d'après leurs cerneaux) durant les gradations précédentes. Cela démontre que les attaques de chenilles ne se font pas au hasard. Il y a plusieurs explications possibles et probablement complémentaires:

- Les chenilles ont des préférences thermiques et d'ensoleillement qui les font proliférer et se fixer toujours dans les mêmes conditions (lisières sud des massifs, versants chauds, altitudes basses ou moyennes, peuplements ouverts). Ce sont donc toujours les mêmes placettes de notre échantillon qui correspondent à ces critères. Ces critères de prolifération peuvent correspondre à des zones de plus grande sensibilité au climat. Ils ne correspondent pas à des niveaux de productivité faibles, car les classes 3 et " ≥ 5 " ont dans l'absolu des cerneaux plus larges que la moyenne des autres classes. Cependant, nos analyses statistiques n'ont pu mettre en évidence aucune relation statistiquement significative entre le nombre de nids et les facteurs du milieu (altitude, exposition, pente, ...).
- Ces relations chenilles/milieu, qui sont démontrées par ailleurs, sont donc cachées dans notre échantillon par des interactions avec le type de peuplement et d'autres facteurs complexes. Il peut y avoir notamment un effet de dispersion: les femelles ne se dispersent que sur quelques kilomètres. Dans les zones les plus favorables aux chenilles, à basse altitude et en versant chaud, il y a peu de pin sylvestres, et une grande fragmentation des peuplements, assez distants entre eux.

Ce ne sont pas des conditions favorables à la prolifération, et cela brouille les relations statistiques entre le milieu et les chenilles.

- De plus, la culmination de 2015-16 a été exceptionnellement forte, et le climat très chaud en hiver, ce qui a sans doute conduit des chenilles à se développer dans des sites habituellement peu favorables.
- Il y a aussi peut être un effet de récurrence des populations résiduelles après chaque attaque. Bien qu'elles tombent parfois à des niveaux très bas après une culmination (mais jamais à 0), ces populations résiduelles ne partent pas de rien pour la prochaine culmination. En raison de la multiplication exponentielle des chenilles, une petite différence de départ, liée à la densité de la dernière culmination, peut suffire à faire une grosse différence à l'arrivée, reproduisant ainsi les mêmes schémas.
-

Dans tous les cas, la récurrence des chenilles sur certains sites a un effet fort, répété et durable sur la productivité des peuplements concernés.



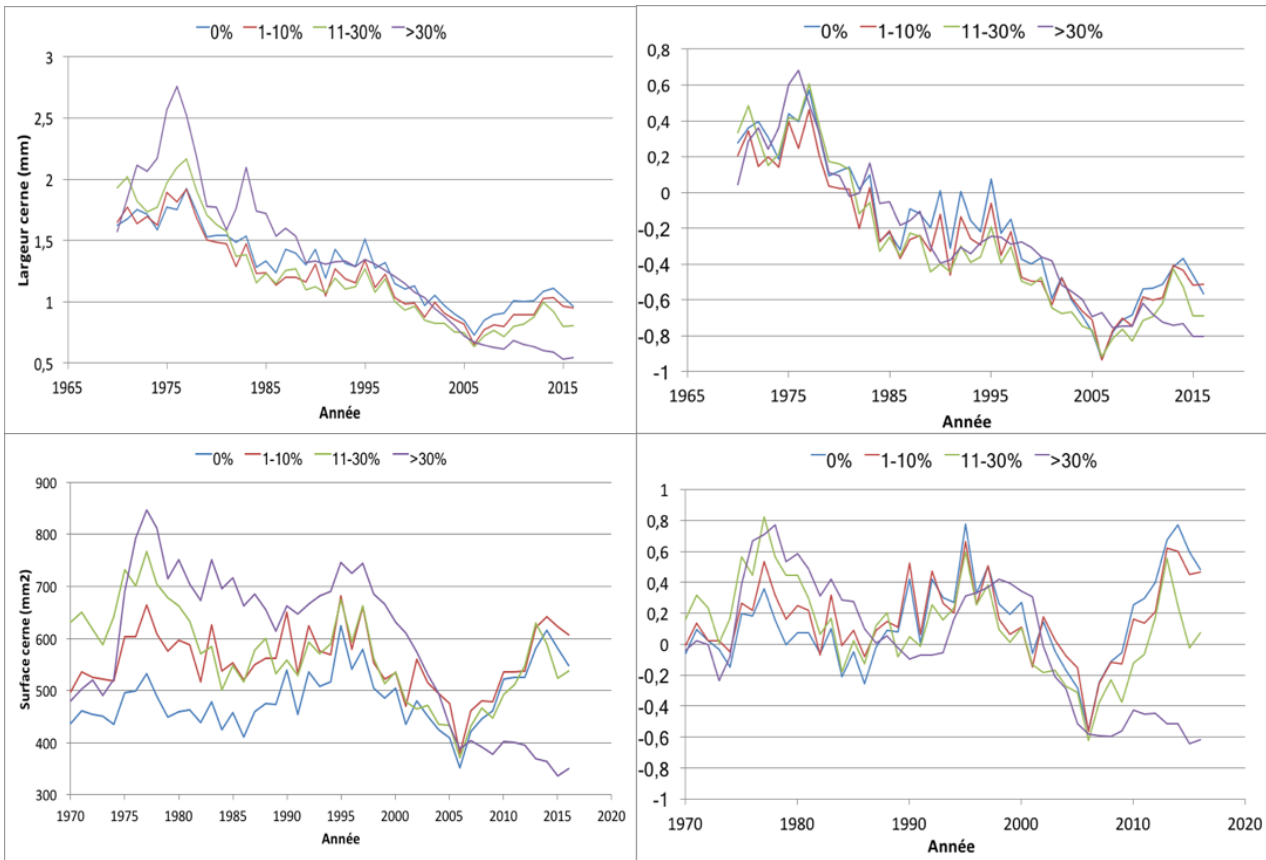
Perte de productivité observée de la croissance du pin sylvestre en fonction du nombre de nid de chenilles / 100 arbres de 1981 à 2016, en fonction de la classe d'attaque (3+4 et ≥5). Il n'y a pas de tendance significative pour la classe 1+2. La perte est cependant significative en valeur absolue.

Croissance selon la présence de gui

Les arbres appartenant aux différentes catégories d'infestation par le gui ne sont pas forcément situés dans des conditions de milieu identiques (fertilité, altitude, topographie) ni dans des peuplements similaires pour l'âge et la densité. Leur valeur absolue de croissance n'est donc pas à prendre au premier degré, notamment pour les arbres les plus guités qui sont peu nombreux. Il faut plus s'attacher aux variations relatives de croissance dans le temps et à la réponse aux stress. Une analyse beaucoup plus fine, croisant gui et autres caractéristiques des peuplements et du milieu, sera nécessaire pour approfondir ces résultats.

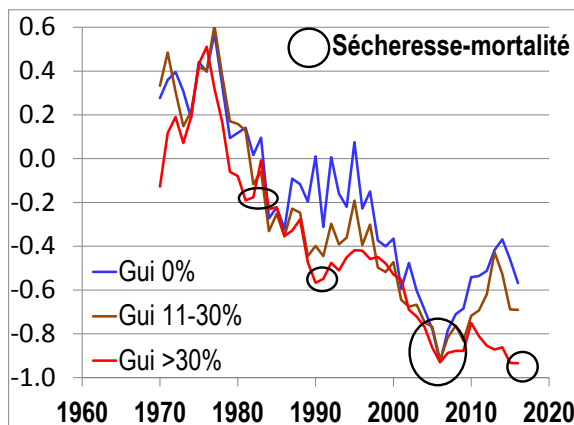
On note que les arbres les plus guités actuellement ont poussé en moyenne plus vite en diamètre que les autres depuis les années 70. Ils sont situés dans des peuplements plus jeunes ou moins denses. C'est peut être aussi partiellement le résultat d'une sélection par les sécheresses de la décennie précédente: les arbres très guités dont la croissance était déjà faible sont morts (cf. interprétations suivantes).

Les arbres les plus guités (>30% de taux de gui dans le houppier) ont subi depuis le début des années 80 une chute de croissance plus forte que les autres. Après la période de chute commune à toutes les classes de gui entre 1995 et 2006, la classe >30% s'oppose aux autres car elle ne montre aucune résilience, et la productivité continue de diminuer. Après la chute de productivité observée entre la fin des années 70 et 1985, il y avait déjà eu un manque de résilience des arbres très guités. Il a fallu attendre 8 à 10 ans pour que ces arbres retrouvent une productivité relative similaire aux autres classes.



Evolution de la croissance et productivité brute (à gauche) et relative (normée sur les 100 dernières années- à droite) en fonction du taux de gui dans le houppier des arbres

Une normalisation sur la période récente des données avec centrage sur 2006 permet d'encre mieux préciser l'accroissement progressif du manque de résilience des arbres gâtés (voir schéma ci-après).



Evolution relative de la croissance des cernes, normés sur la période 1970-2016 et centrés sur 2006. Les cercles noirs indiquent des périodes de sécheresse marquée qui se sont traduit par des dépérissements et mortalités relatés dans les annales régionales.



La mauvaise année 1970 a déjà plus fortement marqué les arbres actuellement les plus gûtés, mais il ne leur a fallu que 2 ans pour rentrer dans la norme. Les sécheresses de 1979 et 1982 les ont fait aussi décrocher, et il leur a fallu 3 à 4 ans pour rattraper leur retard. Ils ont de nouveau décroché à la fin des années 80 (notamment grande sécheresse de 1989) et ils ont alors mis 6 à 7 ans pour se remettre. Juste à temps avant la chute brutale de 2003-2007, pour laquelle ils ont décroché très vite: 10 ans après la fin de cet épisode, ils n'ont toujours pas récupéré, et de très loin. Leur état de santé actuel fait présumer d'une mortalité attendue au prochain épisode de forte sécheresse.

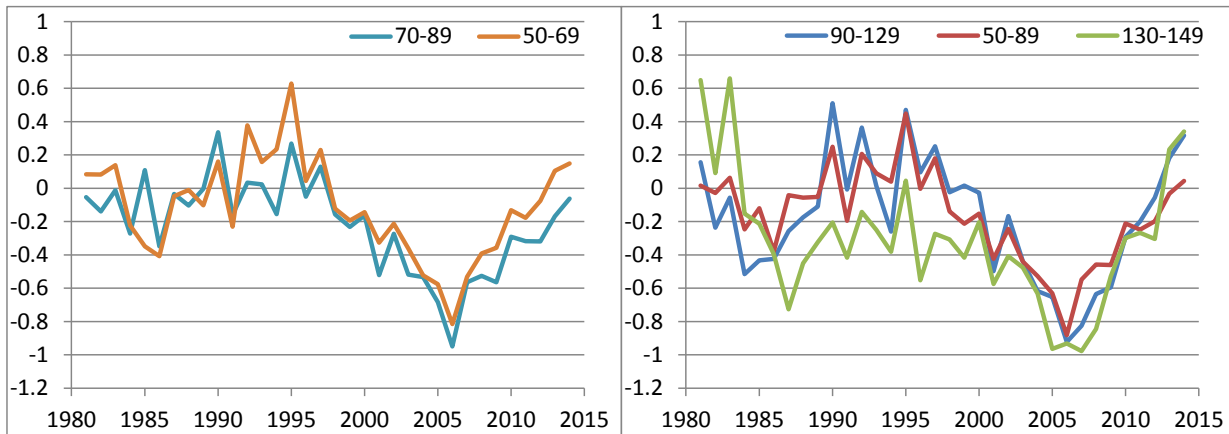
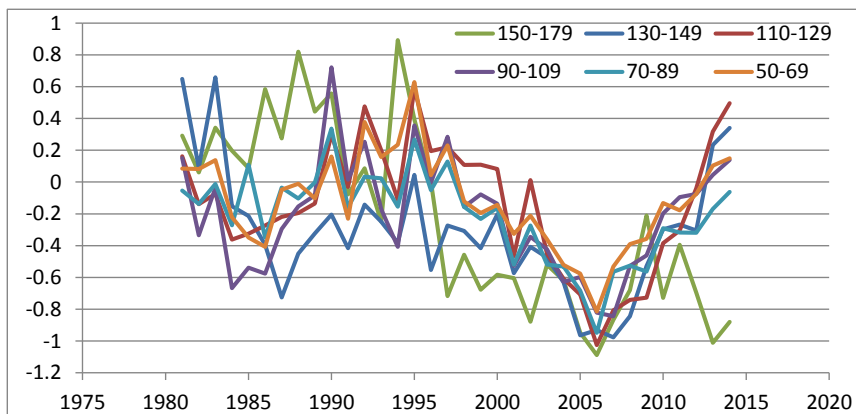
Les arbres actuellement moyennement gûtés suivent le même chemin avec 10 ans de décalage. On les voit décrocher faiblement et se remettre rapidement (2 ans) après 1979, décrocher plus fortement et longuement après 1989, décrocher rapidement en suivant la classe >30% durant la chute 2003-2007, mettant 7 à 8 ans pour remonter, avant de repartir fortement à la baisse avec les dernières années sèches récemment. On présume qu'ils subiront le même sort que les arbres les plus gûtés (aucune résilience) lors du prochain épisode sec.

Ces observations détaillées permettent de dire qu'il faut environ 40 ans en moyenne au gui, lorsqu'il s'installe et se développe sur des arbres, pour atteindre un niveau critique pour leur survie. Cet effet du gui mesuré dans les conditions du passé, risque de s'accroître avec la sévérité des sécheresses qui stressent de plus en plus les arbres: le développement du gui est en effet conditionné, entre autres, par la transparence du houppier des arbres attaqués. Plus le houppier est transparent, plus il y a de lumière disponible pour le gui, ce qui accentue sa demande en eau, donc son effet stressant sur l'arbre en retour. Le délai entre infestation initiale et risque de mortalité devrait donc se raccourcir dans le futur.

On note également que les arbres les plus gûtés ne suivent pas comme les autres arbres les variations interannuelles dues au climat, et même qu'ils ne sont quasiment plus réactifs aux variations interannuelles depuis 1990. Ce manque de réactivité s'accroît progressivement entre 1970 et 2016, avec sans doute le développement progressif du gui et son effet sur ces arbres. La tendance du gui à pomper autant d'eau que nécessaire pour lui, et autant que disponible dans l'arbre quel que soit le niveau de stress hydrique, explique que l'arbre ne profite plus des années un peu meilleures entre des années mauvaises.



Croissance et classe d'âge



Séries de données indicées par classe d'âge

La classe « 150-179 ans » s'effondre dans la période récente et ne se remet pas des années 2003-2007 (pas de résilience). La classe « 130-149 ans » baisse fortement au début des années 80 (les sécheresses de 1979 et 1982 sont probablement en cause), ne se relève pas jusque dans les années 2000 et subit plus fortement que les peuplements plus jeunes la période 2003-2007 avec une moins bonne résistance et une moins bonne résilience initiale. La mortalité élevée chez ces vieux arbres explique que la croissance relative finisse par rejoindre celles des autres classes en valeur relatives (mais elle reste faible en valeur absolue). La différence entre les classes « 50-89 ans » et « 90-129 ans » est dans le détail: les arbres les plus vieux ont moins bien encaissé le début des années 80 et n'ont rejoint les plus jeunes que vers 1990. Puis ils ont été un peu moins résilients après 2007, jusqu'en 2010. Ce sont des nuances qui peuvent toutefois avoir leur importance sur le long terme si des évènements du même type se répètent plus souvent.



Croissance et évolution du climat

Pour analyser les relations entre la croissance et le climat, nous avons employé la méthode de la régression PLS (voir parie « méthode-traitement des données »).

Pour la classe d'âge 50-89 ans, on obtient le modèle donné dans le tableau suivant.

Le modèle est très bon, le R^2 est de 88.15. Ceci paraît incroyablement bon, nous avons alors testé la corrélation de chaque variable explicative avec la variable à expliquer. Il n'y a aucune variable explicative fortement corrélée individuellement avec la variable à expliquer (r^2 max = 0.19). Donc le modèle est validé.

Parmi les 10 facteurs ayant le plus de poids dans le modèle, nous observons :

- 6 facteurs corrélés positivement à la croissance et relatifs à l'hiver et au début du printemps, donc à la saison fraîche ;
- 7 facteurs liés à l'année n-1 dont le premier ;
- que les températures et le rayonnement du mois de mars sont représentés dans 4 des 5 variables les plus puissantes.

Le fait que l'année n-1 a un poids très fort dans le modèle vient sans doute en partie de la période continue défavorable 2003-2007, dans laquelle la chute de largeur de cerne ne s'explique pas par le climat de l'année seule mais par l'accumulation d'années défavorables. De même, la reprise lente en 2008 est expliquée par la prise en compte des effets différés de 2007. Cette prise en compte sur 2 ans rend bien compte des variations de cernes malgré les effets différés.

Modèle de relation climat croissance pour la classe d'âge 50-89 ans
(Tri par valeurs décroissantes de poids dans le modèle)

	int conf 5%		Coef		P		
n-1~nTn_3	0.1043	0.2508	0.212062	0.212062	**	n-1	print
RAY3	0.0673	0.2542	0.17345	0.17345	**	n	print
MTn_01.02	0.0797	0.2412	0.165828	0.165828	**	n	Hiv
n-1~nTn_01.03	0.0428	0.1906	0.150603	0.150603	*	n-1	Hiv
nTn_3	0.0502	0.2256	0.148954	0.148954	**	n	print
n-1~Pan	0.0043	0.2219	0.141191	0.141191	*	n-1	An
n-1~MTn_11.12	0.0414	0.1705	0.131462	0.131462	**	n-1	Hiv
n-1~MTM_04.06	-0.1807	-0.0576	-0.12603	0.12603	***	n-1	print
n-1~MTn_6	-0.1922	-0.0402	-0.123416	0.123416	**	n-1	Juin
n-1~MTM_8	0.0133	0.1978	0.121441	0.121441	*	n-1	Eté
XTX_9	-0.168	-0.0576	-0.120286	0.120286	**	n	Aut
Pan	0.0305	0.1769	0.118663	0.118663	*	n	An
MTM_6	-0.1541	-0.0576	-0.116678	0.116678	**	n	Juin
P_06.08	0.0401	0.187	0.107993	0.107993	**	n	Eté
n-1~MTX_09.10	-0.1924	-0.0577	-0.101982	0.101982	***	n-1	Aut
n-1~RAY9	-0.1924	-0.0042	-0.0914161	0.0914161	*	n-1	Aut
n-1~Ptot_9	-0.0064	0.1733	0.0879595	0.0879595	(*)	n-1	Aut
n-1~ETP_4	-0.1496	8.00E-04	-0.0821965	0.0821965	(*)	n-1	print
MTM_04.10	-0.1361	-0.0018	-0.070971	0.070971	*	n	An
RAY_06.10	-0.1351	-0.0023	-0.0619038	0.0619038	*	n	Aut

Dès le mois d'avril, les températures ou les variables qui en sont dépendantes (ETP) basculent en négatif. La fin d'hiver et le tout début du printemps sont donc une période critique où le réchauffement climatique peut jouer des rôles contradictoires: favoriser la croissance en raccourcissant la période de repos hivernal, et la défavoriser en limitant la croissance de printemps dès avril.

Juin est un mois critique aussi: 6 variables y font directement référence, avec un effet négatif des températures élevées et du rayonnement, et un effet positif des pluies.

Les cerne dépendent ensuite surtout de l'automne (mois de septembre-octobre, avec les températures en négatif et la pluie en positif).

Les températures du pic de l'été (juillet et août), n'entrent pas dans le modèle en tant que tel. On ne les retrouve qu'à travers des variables plus larges dans l'année n (RAY_06.10 et MTM_04.10). Ce qui signifie que l'arbre est de toute façon en résistance avec une croissance stoppée dans quasiment tous les cas durant juillet-août, donc peu sensible pour sa croissance aux conditions du moment, même extrêmes (il peut y avoir par contre des effets sur sa santé). La fin de printemps jusqu'à l'automne sont des périodes de croissance potentielle qui vont jouer fortement sur le cerne de l'année (jusqu'en juin durée de la croissance initiale) ou en automne de l'année suivante (préparation des bourgeons, accumulation de réserves, polycyclisme (fréquemment observé sur les cerne dans nos échantillons). Curieusement, les températures du mois d'août n-1 apparaissent fortement en positif. Il s'agit peut-être d'un artéfact.

Un seul des facteurs est limité à l'été et centré sur lui: P_06.08. Ces pluies d'été sont clairement identifiées comme importantes, même si elles sont plutôt loin dans le tableau en terme de poids. Une diminution de ces pluies avec le changement climatique, comme cela est prévu par les scénarios climatiques, aura donc un effet direct négatif. Les pluies cumulées de l'année n-1 figurent en bonne place dans le tableau, ce qui signifie que l'arbre profite d'une année pluvieuse pour accumuler des réserves qui serviront l'année suivante. Les pluies cumulées sur toute l'année n ont aussi du poids, bien que ce soit plus modéré. Il faut noter que les variables P-ETP sur différentes périodes ont toutes disparu du tableau final, mais que le P-ETP annuel était significatif pour les deux années (n et n-1) dans l'avant dernière étape. Si les pluies de périodes plus courtes ne ressortent pas, c'est sans doute aussi en raison de l'assez courte série étudiée.

Un modèle a également été établi pour la classe d'âge 90-129 ans. On y retrouve les éléments essentiels du précédent, avec un R^2 plus faible mais bon quand même (0.85).



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Résumé des résultats

Le pin sylvestre est impacté par des défoliations importantes (taux de défoliation moyen de 48% sur les placettes échantillonnées). Ceci rejoint :

- D'une part les résultats issus du réseau de placettes permanentes du DSF, à savoir qu'aujourd'hui près de la moitié des arbres suivis présente un déficit foliaire supérieur à 25% - contre 15% des arbres en 1990.
- D'autre part les résultats obtenus par l'ONF sur l'Observatoire Départemental du dépérissement des forêts des Alpes Maritimes où le déficit foliaire varie entre 42% et 55% selon les massifs concernés.

Les expositions chaudes et les hauts de versants sont plus impactés. Une tendance, mais non significative, montre qu'au-delà de 1400 m le taux de défoliation baisse.

Parmi les critères expliquant la défoliation deux facteurs biotiques ressortent fortement. Le premier est la présence de gui. Plus l'importance de la colonisation du gui est importante dans le houppier plus le taux de défoliation est élevé. Bien que secondaire, le nombre de nid de chenilles processionnaires joue également un rôle sur le taux de défoliation. Ce deuxième facteur est en partie conjoncturel, faisant suite à la récente culmination de chenilles, mais on a vu que les zones régulièrement attaquées par la processionnaire montraient des pertes durables de croissance. Les autres paramètres rentrant en ligne de compte sont de type stationnel, avec en premier lieu l'indice topo-édaphique développé par l'Irstea. Enfin, plus la surface terrière est faible plus le taux de défoliation est élevé: sans doute en raison du lien entre surface terrière et fertilité de la station, mais peut être aussi de la préférence de la processionnaire pour les houppiers bien ensoleillés, donc les peuplements clairs.

La présence de gui et son taux de colonisation sont quant à eux principalement liés à des facteurs stationnels. Plus les stations sont chaudes et sèches, plus le gui est présent. Et plus le gui est présent, plus le risque d'avoir de forts taux de défoliation (et donc des placettes dépérissantes) est élevé. Aucun lien entre le climat, la station et le peuplement n'a pu être mise en évidence de façon significative avec la présence de la chenille processionnaire, qui a donc un côté spatialement aléatoire, et une forte récurrence locale.

L'approche dendrochronologique a permis de montrer:

* les effets des sécheresses passées : les arbres dont la croissance décrochent lors d'un gros stress sont ceux qui meurent la fois d'après.

* les effets à moyen terme du gui :

- Perte forte de croissance pendant et après chaque accident climatique, se prolongeant plusieurs années, d'autant plus longtemps et fortement que le pourcentage de gui est élevé,
- Au-delà de 40 ans d'infestation par le gui, les arbres ne montrent plus aucune résilience (ce délai de 40 ans va se réduire avec l'augmentation à venir des stress hydriques et de leur fréquence),
- Les arbres vieux sont plus sensibles que les jeunes pour un niveau de gui similaire.

* l'évolution de la productivité : augmentation entre 19^{ème} siècle et milieu du 20^{ème}, avec un pic dans les années 70 et une baisse s'amorçant entre le début des années 80 et le milieu des années 90 suivant les conditions locales et l'âge des peuplements. Cette évolution montre l'effet du changement climatique avec une augmentation de la productivité due probablement à l'augmentation du taux de CO₂ et à l'allongement de la saison de végétation. Puis, les sécheresses marquées entraînent une chute à partir du seuil critique des années 80-90.



* les effets de la densité des peuplements et de la fertilité.

Sur les très bonnes stations, la croissance montre un effet de résilience suite aux stress hydriques et la défoliation reste faible.

Sur les stations intermédiaires, on note un effet très fort de la densité sur la résilience après un accident climatique. Les densités déjà faibles sont favorables. Et les peuplements ayant connu de forte mortalité montrent un effet favorable sur la croissance du à l'effet éclaircie induit par la mortalité.

Sur les stations très mauvaises, la surface terrière étant initialement faible il y a peu d'effet d'éclaircie ; celle-ci ne fait pas gagner en résilience. La productivité est très faible, le peuplement est plus ou moins condamné à court ou moyen terme.

Ainsi, les éclaircies sont utiles sur les très bonnes stations et les stations intermédiaires.

* les effets de la chenille processionnaire

Quand elle est fortement présente, l'effet est fort sur la défoliation et la perte de croissance. Elle affaiblit durablement les arbres en les rendent plus sensibles aux accidents climatiques. La pression des chenilles augmente avec le réchauffement (moins de régulation par l'hiver) : les pullulations sont plus abondantes, même si la fréquence reste similaire, et sont peut-être aussi plus longues (2 à 3 ans ans de pic au lieu d'1 an). Entre 1996 et 2008, les populations de chenilles ne sont jamais redescendues à un niveau très faible, ce qui s'est traduit sur les zones attaquées par une perte continue de productivité, oscillant entre 10 et -20% par rapport aux zones non-attaquées. Plus les accidents climatiques deviennent fréquents, plus la probabilité d'addition des deux phénomènes (stress climatique et pullulation de chenilles) devient forte. Ainsi le risque de dépérissement devient plus fort, qu'il intervienne soit immédiatement, soit au prochain accident climatique suite à une période de non-résilience.

Enquête sur les stratégies d'adaptation existantes

Un questionnaire a été conçu en concertation avec les partenaires du projet puis diffusé par mail sous la forme d'un sondage en ligne et par papier lors de réunions de sensibilisation du CRPF. 43 propriétaires y ont répondu. L'étude n'a donc pas une valeur statistique mais un caractère qualitatif. L'analyse des résultats montre notamment que près des ¾ des propriétaires ont constaté des changements dans leur forêt : dépérissements (32%), attaques de ravageurs (26%), augmentation du risque incendie (16%) et difficulté de régénération d'une essence (15%). Ils sont 34 % à être préoccupés par l'augmentation des risques (incendies, tempêtes), 18% par les impacts sur la biodiversité, 13% par ceux sur la production de bois et 13 % encore par ceux sur les autres productions forestières (truffes, champignons, miel).

Face à cela, 71 % des propriétaires ont eu une stratégie d'adaptation plus ou moins variée : diminution des risques sanitaires et incendie, préservation du mélange d'essences ou enrichissement en espèces climatiquement plus adaptées, mise en œuvre d'une sylviculture plus « douce » (type Pro Silva) ou au contraire intensification de la gestion. Ces recherches d'adaptation sont le reflet d'une préoccupation des propriétaires. L'incertitude sur les impacts à court et moyen termes des changements climatiques est forte ainsi que celle sur les résultats des mesures d'adaptation. Le manque de connaissances sur le sujet est aussi un frein. On retrouve également des blocages traditionnels à la gestion en forêt privée : le morcellement et la difficulté de monter des opérations seuls, problématiques qui peuvent trouver leur solution dans le regroupement, et les problèmes liés au gibier (difficulté de régénération ou de protection des plantations).

Restent les coûts des mesures d'adaptation, qui découragent 17% des propriétaires. Investir, surtout dans une situation où les risques augmentent, est très compliqué. Dans la région méditerranéenne où les revenus forestiers sont faibles, les investissements en plantation ne peuvent être induits que par une politique forestière forte avec des aides adaptées au contexte.



Mise en pratique des résultats

Face aux résultats de cette étude, des premières pistes de recommandations sylvicoles peuvent être amenées. Elles ont été discutées en Comité de Pilotage avec les différents partenaires (organisme de recherche, gestionnaires, etc).

Éléments pour un diagnostic

Avant de proposer toute recommandation de gestion, la première étape est de **réaliser un diagnostic** pour chaque situation:

- a) De l'état sanitaire du peuplement²: taux de défoliation selon le protocole DEFIFOL du DSF, taux de gui, taux de chenille processionnaire dans les périodes de pullulation,
- b) Des conditions climatiques : zone de vigilance climatique (grâce à la carte de vigilance climatique). Attention, il est nécessaire pour cela d'utiliser un SIG (la carte papier n'est pas assez précise).
- c) Des conditions stationnelles : situation topographique, indice topo-édaphique,
- d) Des caractéristiques dendrométriques : âge du peuplement, surface terrière ou densité,

51

Les situations présentant le plus de risques peuvent être résumées de la façon suivante :

-facteurs biotiques :

- ∞ forte présence de gui (> 10% de gui dans les houppiers, soit > 25% des arbres ayant plus de 30% de gui)
- ∞ forte présence de chenille lors des dernières pullulations (en moyenne plus de 1 nid/arbre). Attention, cette présence de nid n'est pas permanente.

-facteurs climatiques :

- ∞ zone de vigilance climatique élevée et maximale (ce qui correspond aux versants chauds, aux faibles altitudes et aux positions topographiques convexes)

- facteurs stationnels :

- ∞ bilan en eau défavorable (haut de versant, etc)
- ∞ Indice topo-édaphique <-15

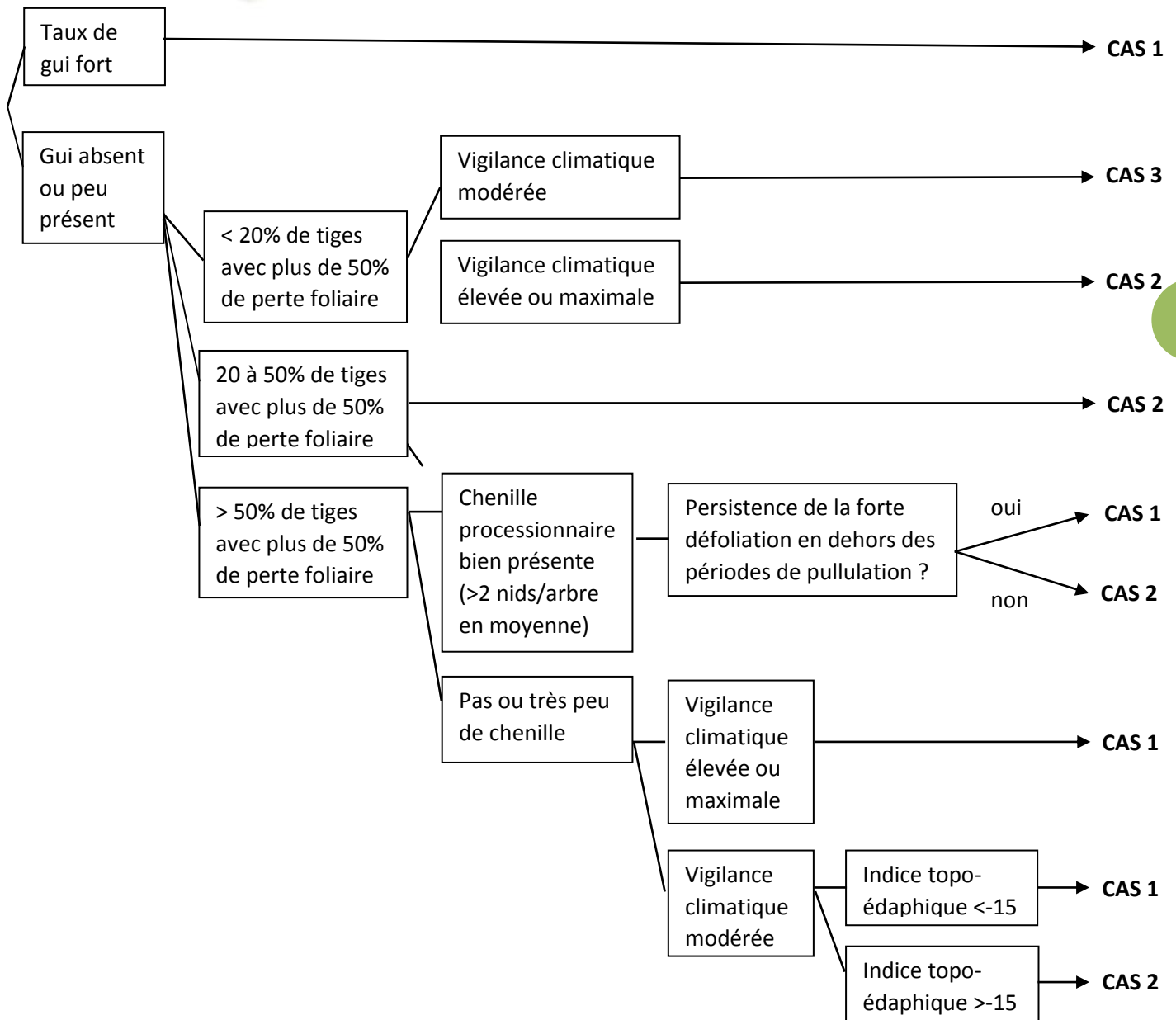
-facteurs liés au peuplement :

- ∞ âge élevé (supérieur à 90 ans)
- ∞ forte densité

⇒ La vigilance doit être d'autant plus forte que le nombre de facteurs défavorables est élevé.

La **clé d'aide à la décision** suivante a été établie afin de définir des grandes classes de situations et d'aider les propriétaires et gestionnaires dans leurs choix :

² La formation des techniciens forestiers au diagnostic sanitaire est à prévoir.



Pour estimer la perte foliaire, se reporter aux exemples de photos en page 9.

Le taux de gui est considéré comme fort si son taux de recouvrement dans l'ensemble des houppiers du peuplement est en moyenne supérieur à 10%, et faible sinon. **Pour estimer ce taux de recouvrement**

Recommandations de gestion

Ces recommandations sont liées à la clé présentée ci-dessus.

CAS 1 :

Il s'agit des cas de **fort dépérissement** du pin sylvestre. Cette essence n'ayant pas d'avenir à terme dans ces conditions, il est conseillé de tendre progressivement vers une transformation du peuplement afin de changer d'essence.

Toutefois, en cas de présence d'au moins 100 tiges/ha ayant un avenir possible (tiges bien développées, non guitées et ne présentant pas une forte perte foliaire), il est encore possible de réaliser des éclaircies à leur profit avant d'envisager la transformation.



Pour tendre vers la transformation :

- des éclaircies ciblées peuvent favoriser à terme et de manière progressive l'apparition de nouvelles essences. De plus, ces éclaircies ciblées viseront à éliminer les arbres les plus gûités;
- l'introduction d'essences par reboisement en plein ou enrichissement permettra une évolution plus rapide.

Pour les très mauvaises stations (crêtes,...), on pourra toutefois s'interroger sur la pertinence d'investir dans un boisement compte tenu des faibles enjeux de production de bois et de la prédominance des autres fonctions de la forêt.

CAS 2

Ces cas correspondent à des **situations intermédiaires** où le pin sylvestre montre des signes notables de dépérissements mais est encore capable de résilience. Ces situations peuvent aussi être des cas sans signe de dépérissement actuel mais dans une situation à risque du point de vue climatique.

L'objectif va être avant tout de gérer le pin sylvestre afin de le faire perdurer en maintenant sa productivité. Toutefois, comme les stress hydriques risquent de se répéter de plus en plus, ce type de situation risque fort de n'être qu'une situation de transition qui basculera ensuite dans le type précédent « fort dépérissement ». Il est alors conseillé de favoriser aussi les autres essences pour tendre le plus possible vers un peuplement mélangé.

La gestion du pin sylvestre doit dans ce cas-là viser :

- une augmentation de sa résistance au stress hydrique (les éclaircies notamment sont favorables, ainsi que³ la mise en régénération des arbres âgés moins résistants) ;
- le maintien et l'arrivée d'autres essences.

Les interventions suivantes sont donc à favoriser :

- => *Renouveau des arbres de plus de 80-100 ans*
- => *Eclaircies en traitement régulier ou irrégulier fréquentes et orientées. Elles doivent éliminer en priorité les arbres gûités, maintenir les autres essences en place ainsi que des arbres jouant le rôle d'« arbres parasols ». Ces derniers sont des arbres au houppier bien développé qui constitue un ombrage pour les autres arbres réduisant ainsi leur vulnérabilité au stress hydrique.*
- => *Coupes permettant l'arrivée progressive d'une régénération de pin et d'autres essences*

Les interventions suivantes sont à éviter :

- => *Non intervention*
- => *Coupes sylvopastorales en maintenant uniquement des arbres âgés (>80 ans). En effet, ces derniers seront amenés à dépérir et ne pourront plus assurer un renouvellement du peuplement lorsque les bêtes seront enlevées. L'activité pastorale peut être mise en place au sein de jeunes peuplements (20-50 ans).*
- => *Une seule coupe de régénération sans éclaircie préalable.*

CAS 3

Il s'agit des **cas les plus favorables** : aucun signe de dépérissement n'est constaté aujourd'hui et la vigilance climatique est modérée. Il est envisageable de poursuivre avec le pin sylvestre en menant une gestion classique. Toutefois, avec le risque accru de sécheresse, il est conseillé d'être vigilant et d'observer le

³ Des éclaircies fréquentes peuvent ne pas être rentables en cas de volume prélevé trop faible. Pour cela, il est conseillé de les mettre en place sur de grandes surfaces, grâce à des regroupements de propriétaires là où le foncier est morcelé.



peuplement pour y diagnostiquer une éventuelle défoliation. Notamment, si du gui est constaté sur certaines tiges, il s'agira de les prélever en priorité.

De plus, avec le vieillissement, les arbres actuellement jeunes ou d'âge moyen deviendront de plus en plus sensibles aux stress hydriques, et d'autant plus qu'ils seront denses. En raison des risques de sécheresses extrêmes qui augmenteront dans le futur, il faut maintenir ces peuplements à des densités modérées.

La gestion en peuplement irrégulier peut aussi permettre d'augmenter la résilience grâce au maintien permanent d'arbres plus jeunes moins sensibles.

Autre piste de mise en œuvre

Une autre piste a été élaborée pour rendre les résultats de l'étude utilisables sur le terrain. Elle se base sur le calcul d'un indice climat sol.

L'opérateur embarqué sur tablette la carte modélisant le pourcentage moyen des houppiers colonisés par le gui (voir partie « Résultats-Carte de vigilance »). Sur le terrain il relève le pourcentage exact de gui dans la placette et mesure l'indice topoédaphique. À partir de ces trois données, il peut établir la valeur de l'indice climat sol (à partir de l'équation ci-dessous).

Si l'indice climat-sol est > 5 , la station est dite **favorable**, il y a peu de risque d'observer des signes de dépérissement. Si l'indice est < -5 , la station est dite **défavorable**, le risque d'observer des signes de dépérissement est élevé. Si l'indice est situé entre -5 et 5 , la station est dite **moins favorable**. L'équation est spécifique au pin sylvestre sur le territoire d'étude.

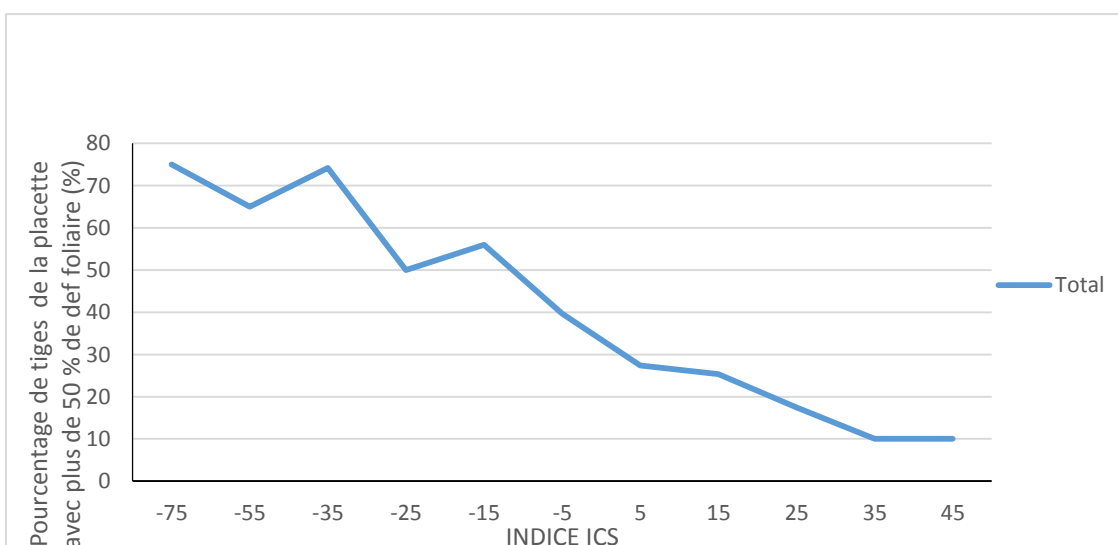
$$\text{Indice Climat Sol} = (32.84 - 2.18 \text{ GUIMOY terrain} + 1.12 \text{ ITE} - 1.12 \text{ GUIMOY modèle})$$

Equation de l'ICS pour le pin sylvestre en PACA

Gui_moy terrain : % de volume du houppier occupé par du gui estimé par l'opérateur sur le terrain

Gui_moy modèle : % de volume du houppier occupé par du gui fourni par la carte modélisée

ITE = indice topoédaphique



Pourcentage de tiges ayant plus de 50% de déficit foliaire en fonction de l'indice climat sol

La figure ci-dessus relie l'indice climat sol avec le pourcentage de tiges ayant plus de 50 % de déficit foliaire sur la placette. Avec un indice climat sol de -15, le pourcentage de tiges avec plus de 50 % de déficit foliaire est de 55 % environ. Ce pourcentage est de 25 pour indice climat sol de 15.

L'outil discrimine bien les stations en fonction du risque de rencontrer ou non un fort pourcentage de tiges ayant plus de 50% de défoliation.

Pistes pour poursuivre l'étude

Analyser plus précisément le taux de dépérissement et de mortalité

Une corrélation a été mise en évidence entre la défoliation et le taux de mortalité. Or ce dernier manque de précision car lors des relevés de terrain, seuls les arbres morts encore sur pied, donc morts récemment, ont été notés. Ces derniers ne suffisent pas à identifier et quantifier la mortalité due au précédent épisode de sécheresse extrême (2003-2007). Il faudrait pour cela identifier les arbres morts au sol qui sont un reflet de la mortalité passée. Retourner sur toutes les placettes permettrait aussi de noter les dépérissements et mortalités très récents, suite à la sécheresse exceptionnelle de 2017, et donc de valider les hypothèses sur ce risque et les clefs proposées. Sur les placettes pour lesquelles des relevés dendrochronologiques ont été fait, la connaissance des mortalités de 2003 à 2010 permettrait de mettre en relation cette éclaircie naturelle avec la résilience de la croissance, qui n'est qu'une hypothèse actuellement, et la croissance passée avec la densité initiale des peuplements. Par ailleurs, la mortalité pourrait aussi être observée sur les photographies aériennes des années passées. Un complément d'étude semble rapidement nécessaire.

Etendre la carte de vigilance climatique à d'autres régions

Les autres régions concernées par le pin sylvestre sont notamment le Massif Central et la Sologne. Des tests pourront être réalisés pour vérifier si la carte de vigilance climatique est valable dans le Massif Central. Pour la Sologne, la carte établie en PACA ne peut être étendue. En effet, elle est établie à partir d'une probabilité de présence du gui, or celui-ci n'y est pas présent. La carte de vigilance climatique pourra être étendue dans les régions où le gui est déjà présent.

Etablir et diffuser un outil utilisable sur le terrain

Lorsque la carte de vigilance climatique sera considérée comme diffusable, un outil directement utilisable par les gestionnaires et propriétaires forestiers sur le terrain pourra être établi et diffusé. Il reprendra les principaux éléments de cet étude (éléments de diagnostic de l'état sanitaire, carte de vigilance climatique sous format informatique, clé d'aide à la décision, préconisations de gestion associées). Un projet de cet outil est présenté en annexe 10.

BIBLIOGRAPHIE

- Barbero, M. & Quézel, P. (1990). La déprise rurale et ses effets sur les superficies forestières dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, (41), p.77–88.
- Becker, M. (1979). Indices de climat lumineux combinant pente et exposition. *Bulletin D'écologie*, 10(2), p.125–137.
- Berg, E. E., David Henry, J., Fastie, C. L., De Volder, A. D., & Matsuoka, S. M. (2006). Spruce beetle outbreaks on the Kenai Peninsula, Alaska, and Kluane National Park and Reserve, Yukon Territory: Relationship to summer temperatures and regional differences in disturbance regimes. *Forest Ecology and Management*, 227(3), p.219–232
- Bigler, C., Bräker, O. U., Bugmann, H., Dobbertin, M., & Rigling, A. (2006). Drought as an inciting mortality factor in scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems*. p.330-343.
- Bontemps, J.D., Vallet, Patrick - Hervé, J.C., Rittié, D., Dupouey, J.L., Dhôte, J. F. (2005). Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité. *Revue Forestière Française*, vol.LII(2), p.123–142.
- Bréda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers, p.109–131.
- Bréda, N., Roland, H., André, G., & Erwin, D. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought : a review of ecophysiological responses , adaptation processes and long-term consequences. *Annales Des Sciences Forestières*, 63, p.625–644.
- Charru, M., Seynave, I., Morneau, F., & Bontemps, J. (2010). Forest Ecology and Management Recent changes in forest productivity : An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L .) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, 260(5), p.864–874.
- Corriol, G. (n.d.). Étages de végétation.Conservatoire Botanique National des Pyrénées.
- DGAL. (2010). Surveillance de la santé des forêts: Les dépérissements. Note de service, 11 p.
- Dobbertin, M., Hilker, N., Rebetez, M., Zimmermann, N. E., Wohlgemuth, T., & Rigling, A. (2005). The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) in Switzerland - The result of climate warming? *International Journal of Biometeorology*, 50(1), p.40–47.
- Dobbertin, M., & Rigling, A. (2006). Pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) contributes to Scots pine (*Pinus sylvestris*) mortality in the Rhone valley of Switzerland. *Forest Pathology*, 36(5), 309–322.
- DREAL. (2015). PLAN PLURIANNUEL REGIONAL de DEVELOPPEMENT FORESTIER (PPRDF) Période 2011-2015, 36 p.
- Durrant, T. H., Rigo, D. De, & Caudullo, G. (2016). *Pinus sylvestris* in Europe : distribution , habitat , usage and threats. *European Atlas of Forest Tree Species*, p.132–133.
- Forêt Wallone. (2015). Pin sylvestre. *Fichier Écologique Des Essence*, 12 p. Disponible su <https://fichierecologique.be>. Consulté le 21/05/17.
- Franklin, J. F., Shugart, H. H., Harmon, M. E., Franklin, J. F., Shugart, H. H., & Harmon, M. E. (2013). Death as an Process Ecological The causes , consequences , and variability of tree mortality, 37(8), p.550–556.
- Galiano, L., Martínez-Vilalta J., & F., L. (2010). Drought-Induced Multifactor Decline of Scots Pine in the Pyrenees and Potential Vegetation Change by the Expansion of Co-occurring Oak Species. *Ecosystems*, 13(7), p.978–991.
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014 Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au*



cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 161 p.

- Graham, L. S., Bannister, P., & Burritt, D. (2000). Are Mistletoes Shade Plants ? CO 2 Assimilation and Chlorophyll Fluorescence of Temperate Mistletoes and their Hosts. In *Annals of Botany*, p. 511–519.
- Herrero, A., Rigling, A., & Zamora, R. (2013). Varying climate sensitivity at the dry distribution edge of *Pinus sylvestris* and *P. nigra*. *Forest Ecology and Management*, 308, p.50–61.
- Hódar, J. A., Castro, J., & Zamora, R. (2003). Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. *Biological Conservation*, 110(1), p.123–129.
- IFN. (2010). *La forêt française. Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2005-2009. Région PACA. Rapport*, 23p.
- Kanat, M., Alma Hakki, M., & Sivrikayaa, F. S. (2005). Original article Effect of defoliation by *Thaumetopoea pityocampa* (Den . & Schiff .) (Lepidoptera : Thaumetopoeidae) on annual diameter increment of *Pinus brutia* Ten . in Turkey, 62, p.91–94.
- Keller, T., Édouard, J.-L., Guibal, F., Guiot, J., Tessier, L., & Vila, B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres. *Life Sciences*, (323), p.913–924.
- Ladier, J. (2004). *Les stations forestières des Préalpes sèches; définition, répartition, dynamique, fertilité*, 124p.
- Landmann, G. (1994). Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. *Revue Forestière Française*, (1), p.405–415.
- Laurent-Hervouet, N. (1986). Mesure des pertes de croissance radiale sur quelques espèces de *Pinus* dues à deux défoliateurs forestiers - Cas de la processionnaire du pin en région méditerranéenne. *Annales Des Sciences Forestières*, 43(2), p.239–262.
- Lebourgeois, F. (2002). Cours de bioclimatologie de 1ère année de la formation des ingénieurs forestiers. Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois, Nancy.
- Lebourgeois, F., & Piedallu, C. (2005). Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue Forestière Française*, 331 p.
- Lelou, D. (2010). Les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes après la canicule de 2003 : une approche spatiale de leur déterminisme. Mémoire de fin d'études, Formation des Ingénieurs Forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF, 85 p.
- Lemaire, J. (2014). BioClimSol: Objectif et fonctionnement. *Forêt Entreprise*, (218), p.4–6.
- Lemaire J et Maréchal N. (2011). Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques : comprendre et agir Forêt Entreprise n° 198 p 48 à 50. *Forêt Entreprise*, (198), p 48 à 50.
- Lemoine, B. (1977). Contribution à la mesure des pertes de production causées par la chenille processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) au Pin maritime dans les Landes de Gascogne. *Annales Des Sciences Forestières*, 3(34), p.205–214.
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., de Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science (New York, N.Y.)*, 320(5884), p.1768–1779.
- Manion. (1981). *Tree disease concepts*.
- Marqués, L., Camarero, J. J., Gazol, A., & Zavala, M. A. (2016). Drought impacts on tree growth of two pine species along an altitudinal gradient and their use as early-warning signals of potential shifts in tree species distributions. *Forest Ecology and Management*, (381), p.157–167.



- Martinez-Vilalta, J., Cochard, H., Mencuccini, M., Sterck, F. J., Herrero, A., Korhonen, J. F. K., ... Zweifel, R. (2009). Hydraulic adjustment of Scots pine across Europe. *New Phytologist*, 184, p. 353–364.
- Martínez-Vilalta, J., & Piñol, J. (2002). Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management*, 161(1–3), p.247–256.
- Masson, G. (2005). Pin sylvestre. In *Autoécologie des essences forestières : comment installer chaque essence à sa place, tome 2* (Ed. Tec & doc), p.299–310. Medail, F. (2001). Et Valeur Patrimoniale, 5–22.
- Menzel, A. (2003). Plant phenological “fingerprints” detection of climate change impacts. In Schwartz (Ed.), *Phenology : an integrative environmental science*, p.319–329.
- Nemani, R. R., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Myneni, R. B., Running, S. W., Piper, C., ... Myeni, B. (2014). Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, 1560(300), p.1560–1563.
- Nogués Bravo, D., Araújo, M. B., Lasanta, T., Ignacio López Moreno, J., Nogué Bravo, D., Araújo, M. B., & Ignacio López Moreno, J. (2008). Climate Change in Mediterranean Mountains during the 21st Century. *A Journal of the Human Environment*, 37(4), p.280–285.
- ONERC. (2013). Découvrir les nouveaux scénarios RCP du GIEC, 12 p. Disponible sur: <http://www.driasclimat.fr/accompagnement/sections/175>. Consulté le 15/04/17.
- ONF. (2016). *Observatoire du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes - Bilan de la campagne d'observations de 2016*, 18p.
- Panini, T., & Amandier, L. (2005). Climats pluviométriques et thermiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Analyse des données météorologiques par Système d'information géographique. *Forêt Méditerranéenne*, XXVI(4), p.299–308.
- Perry, H. (2017). Relation productivité et état sanitaire du pin sylvestre en PACA - modélisation en lien avec le climat.
- Riou-Nivert, P. (2007). RIOU-NIVERT P., 2007. Dossier Réchauffement climatique, la forêt privée s'organise. *Forêts de France*, (509), 1 p.7–27.
- Ripert, C., & Vennetier, M. (2002). *Guide technique du forestier méditerranéen français Évaluation des potentialités forestières. Évaluation des potentialités forestières Guide technique du forestier méditerranéen français chapitre 2bis* (Cemagref A), 60p.
- Sardin, T. (1997). La sylviculture des boisements de protection, la problématique de leur renouvellement. *Forêt Méditerranéenne*, XVIII(3).
- 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.
- Thauvin, G. (2011). *Essai de détermination des causes de dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle de la France et des Alpes-Maritimes*, 116p.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), p.55–94.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(23), p.8245–8250.
- Vennetier, M. (2012). Changement climatique et dépérissements forestiers : causes et conséquences. *Changement*



Climatique et Modification Forestière, CNRS, (22), p.50–60.

Vennetier, M., & Ripert, C. (2010). Flore méditerranéenne et changement climatique : la course - poursuite est engagée. *Forêt Méditerranéenne, 36*, p.15–24.

Vennetier M. ; Borgniet L. ; Thabeet A. ; Gadbin-Henry C. ; Ripert C. ; Vila B.; Prevosto B. ; Esteve R. ; Martin W. ; Ndyaye A. (2008). *Impact de la canicule 2003 sur les peuplements résineux de la région PACA.*



ANNEXE 1 : Caractéristiques bioclimatiques de la région PACA

Relief et climat

La région Provence-Alpes-Côte-d'Azur possède un relief très marqué. Elle est délimitée par le littoral méditerranéen au sud et une partie de l'arc alpin à l'Est. Entre ces deux zones, de nombreux reliefs montagneux se dressent : le massif de la Sainte-Baume (1148 m), la montagne Sainte-Victoire (1011 m), la montagne de Lure (1826 m), le massif du Lubéron (1125 m), le massif des Alpilles (498 m) et le Mont Ventoux (1911 m). Les fortes pentes sont donc assez fréquentes et les effets de versant associés au relief sont importants.

L'arrière-pays méditerranéen est caractérisé par une sécheresse estivale marquée, des hivers doux et l'irrégularité des précipitations annuelles comme mensuelles. La zone présente généralement des pics de précipitations en automne et de forts déficits en été. Le régime des pluies se répartit selon deux gradients :

- un gradient nord-sud avec de faibles précipitations près de la mer Méditerranée et des pluies de plus en plus importantes au fur et à mesure que l'on s'en éloigne.
- un gradient ouest-est combinant les effets du vent dominant (mistral) asséchant l'atmosphère et la configuration du relief alpin par effet de foehn (Panini & Amandier, 2005).

De 1998 à 2008, la région PACA a connu un gain de 1,4°C des températures moyennes annuelles et une réduction des pluies printanières et estivales de respectivement 18% et 32% (Vennetier & Ripert, 2010). L'année de canicule de 2003 a été marquée par des températures très élevées de mai à août dans la région (+2 à 6°C par rapport aux normales saisonnières), combinées à une absence totale de précipitation sur la même période (Vennetier *et al.*, 2008). La répétition du déficit des pluies cumulées sur 5 ans est venue renforcer les effets de la canicule. La répartition des déficits pluviométriques annuels pour les années où ce sont concentrées les pertes de vitalité.

Année	2003	2004	2005	2006	2007
Déficit pluviométrique	10-20%	35-40%	10-20%	20-30%	45-60%

Déficits pluviométriques annuels sur la période 2003-2007 en région PACA (Source: Vennetier et al., 2008)

Etages bioclimatiques

A l'échelle locale dans les zones de relief, les variations climatiques sont essentiellement dues à l'altitude et à l'exposition, qui influencent à la fois les précipitations et les températures (Ladier, 2004). De manière générale, le climat est d'autant plus froid et humide que l'altitude est élevée, en modérant selon l'exposition. Ces variations climatiques dues au relief sont synthétisées par la définition d'étages bioclimatiques. Des étages de végétation associés au climat méditerranéen (thermoméditerranéen, mésoméditerranéen et supraméditerranéen) et des climats plus tempérés (montagnard, subalpin et alpin) se superposent.

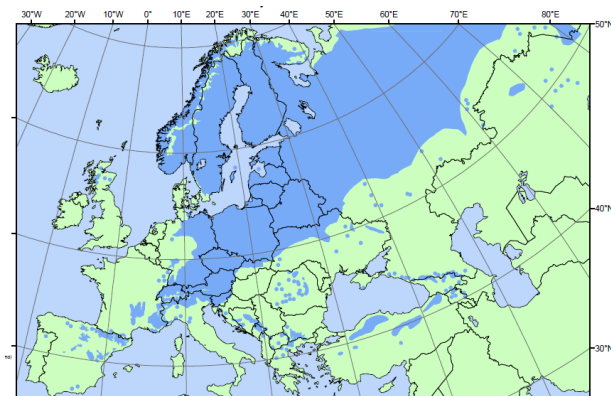
Etage <i>Altitude (m)</i> <i>(Ubac/Adret)</i>	T°moy annuelle	T°moy minimale du mois le plus froid	Précipitations moyennes annuelles	Végétation naturelle dominante	Caractéristiques
Subalpin <i>[1800m ; 2500m] / [1850m ; 2500m]</i>	De -2°C à +4°C	De -7°C à -4°C	900mm - 1000mm	Mélèzin Pinaies Pin à crochet	Période de végétation <200J
Montagnard <i>[1000m ; 1800 m] / [1200m ; 1850 m]</i>	De 4°C à 8°C	De -5°C à -1°C	800-900mm	Hêtraies-Sapinières Sapinières- Pinaies	Disparition des espèces les plus exigeantes en chaleur
Supra-méditerranéen <i>[450m 1000m] / [650m 1200m]</i>	De 8°C à 12°C	De -3°C à 0°C	700-800mm	Chêne pubescent Pin sylvestre	Atténuation des influences méditerranéennes
Méso-méditerranéen <i>[0m ; 450m] / [0m ; 650m]</i>	De 12°C à 16°C	De 0°C à 3°C	<600mm sur la frange littorale 600-700mm à l'intérieur des terres	Chêne mixte Chêne vert Chêne pubescent	- Période sèche estivale marquée - Pics de précipitations en automne - Hiver doux - Peu de gelées

Caractéristiques des étages bioclimatiques des montagnes méditerranéennes (Source : Corriol, n.d.)

ANNEXE 2 : Autécologie du pin sylvestre

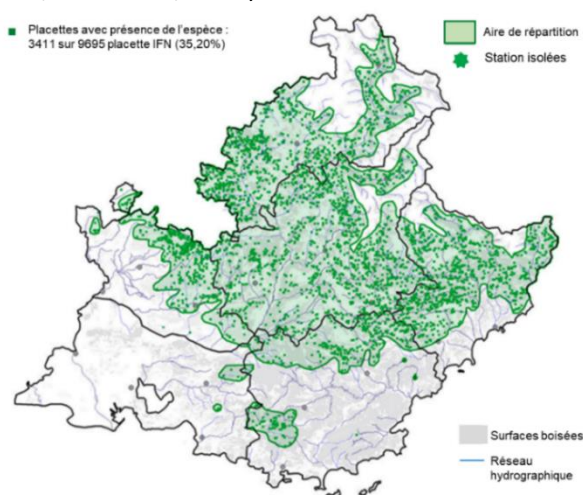
Distribution

Le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) est une espèce pionnière qui possède la plus large aire de répartition parmi les 111 espèces du genre *Pinus* actuellement recensées dans le monde (Barbéro *et al.*, 1998). Elle se retrouve depuis le Portugal jusqu'à la côte occidentale de Russie ; et depuis le nord de la Scandinavie jusqu'au Sud de l'Espagne. Cette large amplitude écologique lui permet d'être présente dans plusieurs étages de végétation (Vennetier & Ripert, 2010), son optimum écologique étant l'étage montagnard. Par conséquent en France, le Pin sylvestre est essentiellement présent dans les Pyrénées, le Massif central, les Alpes et les Vosges.



Carte de distribution du Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris*) (Source: http://www.euforgen.org/distribution_maps.html)

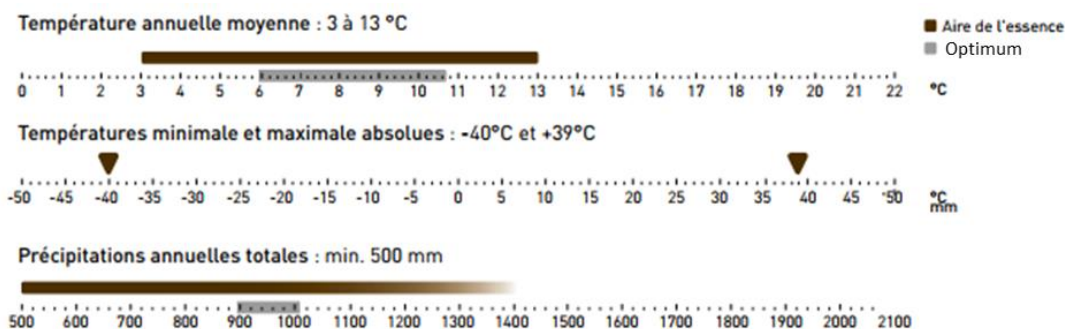
Dans le bassin méditerranéen, l'essence est surtout présente dans la portion occidentale (Portugal, Espagne, France), où elle reste cantonnée en montagne sub-méditerranéenne. Elle colonise les milieux ouverts qui sont principalement les espaces abandonnés depuis la fin du 19^{ème} siècle suite à la déprise agricole (Medail, 2001) et s'y maintient tant que la concurrence ne l'élimine pas (Masson, 2005). En une centaine d'années, les surfaces occupées par le Pin sylvestre en PACA ont été multipliées par 8 (Barbero & Quézel, 1990), atteignant actuellement 250 000 ha environ (Medail, 2001). Essence boréale et montagnarde, le Pin sylvestre atteint la limite méridionale de son aire de répartition en région méditerranéenne (Medail, 2001; Vennetier, 2012).



Répartition régionale du Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (Source: IFN, 2010)

Climat

Le Pin sylvestre est une essence présent dans une large gamme de climats (Barbéro *et al.*, 1998; Masson, 2005). Les limites climatiques de l'essence en terme de températures et de pluviométries sont données ci-dessous. Le Pin sylvestre ferait partie des résineux assez résistants à la sécheresse, probablement grâce à une fermeture précoce des stomates (Bréda *et al.*, 2006). Cependant de récentes études montrent une sensibilité de l'essence aux épisodes climatiques extrêmes (Keller *et al.*, 2000; Martínez-Vilalta & Piñol, 2002), notamment comme lors des périodes de canicule en région méditerranéenne (Vennetier, 2012).



Limites climatiques du Pin sylvestre. (Source : fichier écologique des essences en Région wallonne)

Altitude – Exposition

La gamme d'altitude occupée par le pin sylvestre va de 500 à 1800m (Ladier, 2004) au sud de la France, l'optimum se situant à l'étage montagnard entre 800 et 1500m où sa croissance se trouve être la meilleure (Medail, 2001). L'essence peut atteindre 2100m dans les montagnes méditerranéennes (Medail, 2001) et possède une certaine exigence hydrique qui fait qu'elle domine les lieux plus froids et humides, donc en altitude dans les régions montagneuses (Barbéro *et al.*, 1998).

Le Pin sylvestre est peu sensible à l'exposition (Masson, 2005), même si on le trouve souvent en adret, probablement en raison d'une concurrence moindre de la part des autres essences (ONF, 2016). En PACA, il est surtout présent à l'étage montagnard où il remplace le Hêtre et le Sapin dans les stations sèches (Alexandrian, 1992) et à l'étage supra-méditerranéen (400m-800m) en association avec le Chêne pubescent. Les stations y étant plus chaudes, il aura tendance à être localisé en ubac à basse altitude (Alexandrian, 1992).

Topographie et sol

Le Pin sylvestre possède un système racinaire développé et pousse bien sur des sols meubles à texture siliceuse (Masson, 2005). Mais c'est aussi une essence frugale et résistante au stress édaphique, il est ainsi capable de mettre en valeur les sols pauvres (sols superficiels, peu fertiles, voire compacts). Il reste sensible à la présence de calcaire actif dans le sol qui a un effet négatif sur sa croissance (Ladier, 2004).

Génétique et adaptation

En lien avec l'étendue de son aire de répartition et la grande diversité des conditions écologiques qu'il occupe, le pin sylvestre présente une grande diversité intraspécifique puisqu'il existe au moins 150 variantes (sous-espèces, variétés) dont huit taxons en région méditerranéenne (Medail, 2001). Cette variabilité génétique peut se traduire par des caractères morphologiques différents (structure du bois, forme des aiguilles, port général). Un taxon relictuel en Basse Provence présenterait une activité cambiale bloquée lors de la sécheresse estivale. Une hybridation avec le pin à crochet semblerait possible, des individus intermédiaires ayant été signalés dans les Alpes du Sud. Huit taxons distincts sont généralement considérés en région méditerranéenne dont quatre présents en Espagne.

Forces	Faiblesses
--------	------------



<ul style="list-style-type: none"> - Essence pionnière - Essence frugale - Peu sensible aux gelées, précoces comme tardives - Supporte une période de végétation réduite - Essence robuste vis-à-vis des sols difficiles : accepte les sols très acides/compacts 	<ul style="list-style-type: none"> - Vent/neige/verglas - Engorgement permanent - Sol calcaire plus faible croissance - Concurrence inter-spécifique - Faible productivité en comparaison aux autres résineux - Pollution humaine - Sensible aux fortes chaleurs
---	---

Récapitulatif des forces et faiblesses du Pin sylvestre

ANNEXE 3 : L'outil Bioclimsol

63

La forêt est un écosystème de production à long terme qui présente une forte inertie c.-à-d. une rapidité et un temps d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques limitées si ces changements surviennent trop rapidement. Cette incertitude climatique, cette inconnue du climat futur pourrait décourager le gestionnaire, l'inciter à ne rien changer. Pourtant, c'est cette incertitude qui doit pousser le gestionnaire à définir des stratégies d'adaptation, des choix de mode de gestions. Avec le changement climatique, le forestier est donc désorienté. Les fondamentaux sont remis en cause. Le climat changeant, la relation reliant la production d'une essence à une station devient variable dans le temps. **Le forestier doit se doter de nouveaux outils d'aide à la décision.** Bioclimsol est un outil de gestion novateur permettant de mieux prendre en compte les risques liés aux aléas climatiques de type sécheresse en proposant des cartes de vigilance climatique pour les grandes essences forestières françaises.

(<http://www.foretpriveefrancaise.com/n/bioclimsol/n:558>)

BIOCLIMSOL est un outil numérique fonctionnant sous SIG (gratuit type QGis ou GVsigs) et dès 2020 sous application numérique grâce au financement du projet LIFE Foreccast.

BIOCLIMSOL a pour objectif d'aider les gestionnaires dans la gestion du risque de dépérissement dans la conduite des peuplements sur pied ou le choix des essences en reboisement dans un contexte de changement du climat. Cet outil de diagnostic de la station est développé pour prendre des décisions de gestion à l'échelle de la parcelle

L'acronyme **BIOCLIMSOL** se décompose en :

- **BIO** pour la prise en compte du vivant, en l'occurrence le risque de dépérissement
- **CLIM** pour la prise en compte du climat,
- **SOL** pour la prise en compte des facteurs compensateurs ou aggravants le climat, liés au sol et à la topographie, en particulier la disponibilité en eau.

L'outil est fondé sur **2 principes fondateurs** :

- **1. Carte de vigilance climatique.** Elles sont spécifiques à chaque essence. Chaque carte fournit le niveau de vigilance au regard du climat actuel et futur (Figure ci-dessous). La carte définit des limites climatiques hydriques à partir desquelles la récurrence des sécheresses climatiques engendre un risque accru de dépérissement du peuplement.
- **2. Prise en compte des facteurs du milieu aggravant ou compensant le climat (réserve en eau du sol, topographie...) via un indice « climat sol (ICS) ».**

L'outil, nécessitant un relevé de terrain, ne peut donc être employé depuis le bureau.

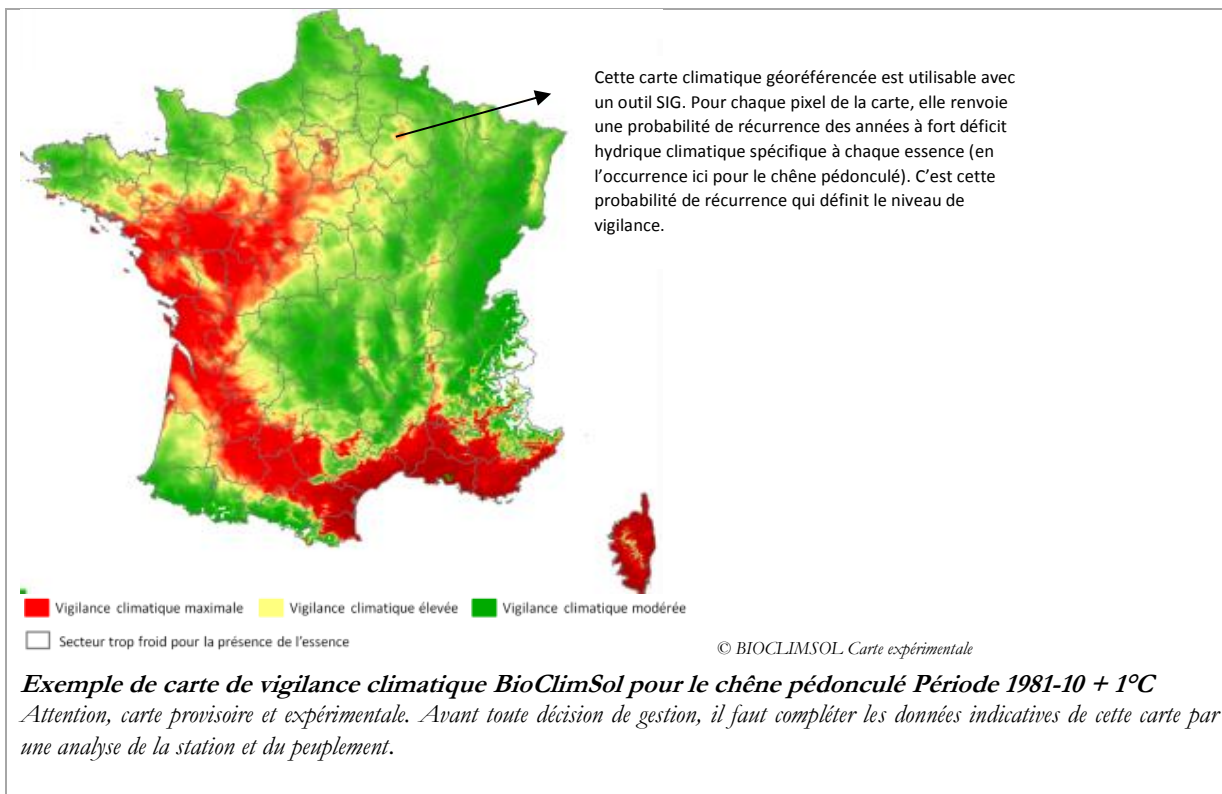


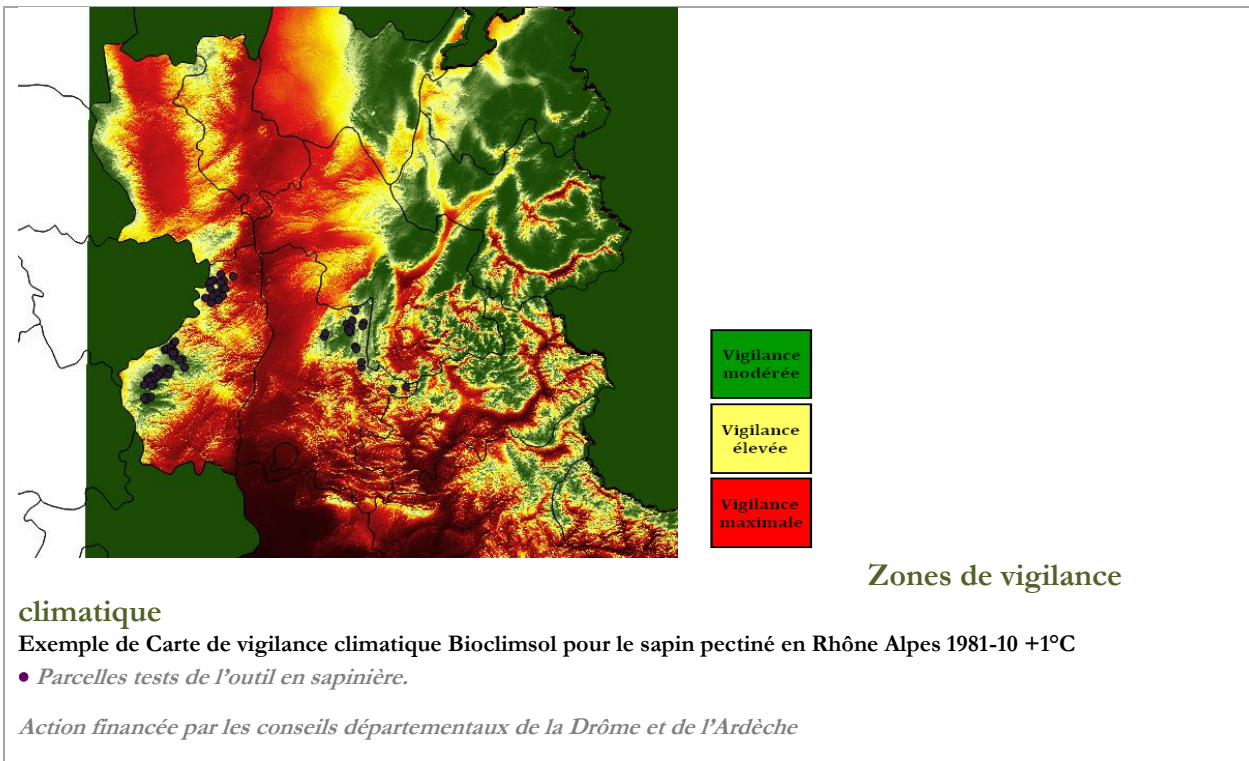
L'outil présente en deux grands modules d'aide à la décision sur le terrain :

- 1. Le **module peuplement sur pied** = gestion des peuplements en place.
- 2. Le **module de boisement** ou de choix des essences lors du reboisement dans un contexte de changement du climat


BioClimSol permet de cartographier des "**zones de vigilance climatique**" spécifiques à chaque essence. L'important n'est pas toujours le climat moyen, mais bien plus les extrêmes climatiques auxquels est soumis un peuplement. Ces zones sont couplées à un **diagnostic de la station grâce à l'indice climat sol (ICS) et du peuplement grâce au protocole archi**, pour préconiser *in fine* des **recommandations sylvicoles** pour la gestion des peuplements sur pied ou des **propositions d'essences** pour les reboisements.

C'est l'ensemble du diagnostic : climat + ICS + peuplement qui permet ces préconisations sylvicoles novatrices dans un contexte de climat changeant.





ANNEXE 4 : Personnes impliquées dans le projet

ORGANISME	Nom	Role dans le projet
▪ IRSTEA	Michel Vennetier	<p><i>Intervention méthodologique</i></p> <p><i>Apporte son expertise en termes de construction d'indice de compensation du climat.</i></p> <p><i>Apporte son expertise en termes d'études relatives au dépérissement du pin sylvestre face au changement climatique et dendroécologie</i></p> <p><i>Validation des modèles et analyses statistiques déployées.</i></p> <p><i>Encadrement d'un stagiaire</i></p>
▪ IDF	Jean Lemaire	<p><i>Intervention méthodologique</i></p> <p><i>Responsable du développement de l'outil bioclimsol.</i></p> <p><i>Apporte son expertise en termes d'emploi des données climatique et de l'outil BIOCLIMSOL</i></p> <p><i>Analyses statistiques</i></p>
▪ CRPF	Pauline Marty	<p><i>Coordination du projet</i></p> <p><i>Intervention méthodologique - Rédaction de rapports</i></p> <p><i>Etablissement d'une stratégie d'adaptation concertée</i></p>
▪ CRPF	Camille Loudun	<p><i>Communication - Enquête sur les stratégies d'adaption existantes</i></p> <p><i>Etablissement d'une stratégie d'adaptation concertée</i></p>
▪ CRPF	Alexandre Jourdan	<p><i>Relevés de terrain - SIG</i></p> <p><i>Insertion des stratégies d'adaptation dans les documents de gestion durable</i></p>
 Stagiaires ingénieurs AgroParistech	<p>Hippolyte Perri</p> <p>Manon Poncet</p>	<p><i>Analyses statistiques, évolution carte de vigilance pédoclimatique suite aux relevés de terrain.</i></p> <p><i>Définition des facteurs de l'ICC suite aux relevés de terrain.</i></p> <p><i>Relevés terrain dendrochronologique. Analyses des cernes. Analyses statistiques.</i></p> <p><i>Rédaction de rapports.</i></p>

ANNEXE 5 : Comptes rendus de réunions

Relevé de décision du Comité technique du 3 mars 2016

Membres et participants

Les membres du Comité technique sont : le RMT Aforce, l'IRSTEA, l'IDF, l'ONF, l'INRA, la DRAAF, le DSF, la DREAL, la Région PACA, l'association Forêt Méditerranéenne et les gestionnaires forestiers (Avisilva, Alcina, Coopérative Provence Forêt).

La liste des participants à ce premier comité technique est présentée en annexe de ce compte rendu.

67

Présentations

- ✚ Le CRPF (Camille Loudun et Pauline Marty) présente le projet Sylforclim avec ses deux volets : le volet « recherche et développement » financé par le RMT Aforce, et le volet « communication et colloque » financé par la DRAAF. Les objectifs et les actions du volet « recherche et développement » sont présentés.
- ✚ L'IDF (Jean Lemaire) présente l'outil bioclimsol, ses caractéristiques, sa méthode d'élaboration, ses objectifs.
- ✚ L'IRSTEA (Michel Vennetier) présente les données sur l'indice foliaire (NDVI calculé à partir des données satellitaires) et son évolution pour les pinèdes des Alpes du Sud ; ainsi que la méthode développée par l'IRSTEA sur l'indice topo-édaphique avec les différents facteurs rentrant en jeu.
- ✚ Le DSF (Jean-Baptiste Daubree) présente les données disponibles sur l'état sanitaire du pin sylvestre en PACA, à savoir les données issues du réseau systématique (23 placettes avec du pin sylvestre suivies entre 1989 et 2015) et les données des signalements (672 signalements sur du pin sylvestre depuis 1973).

Elements discutés et décidés

- ✚ En ce qui concerne l'enquête sur les stratégies d'adaptation existantes, l'enquête sera menée auprès de propriétaires forestiers de la région PACA. Etant donné le faible temps disponible, l'enquête n'aura pas une visée statistique mais plutôt de faire ressortir les profils de propriétaires (ceux qui ne font rien, les proactifs, les réactifs...), et d'identifier différentes stratégies d'adaptation qu'ils mettent en œuvre. Une enquête électronique sera menée, puis des appels téléphoniques ciblés seront réalisés.
- ✚ Concernant le volet communication et le colloque, les discussions portent sur le message à transmettre.
- ✚ Concernant la conception de la carte de vulnérabilité du pin sylvestre, elle se fera à partir des méthodes développées pour l'outil bioclimsol d'une part et pour l'indice topo-édaphique d'autre part, en croisant ces méthodes. Les différentes données existantes sur l'état sanitaire du pin sylvestre seront utilisées.

L'indice topo-édaphique de l'IRSTEA ayant été conçu pour la Provence Calcaire, il sera nécessaire de l'amender pour qu'il réponde également aux conditions du reste de la région. L'ONF a développé un outil topoédaphique pour le Nord de la région. Ce dernier servira à faire évoluer l'indice topo-édaphique conçu pour la Provence Calcaire.





Comité technique du projet SYLFORCLIM

Jeudi 3 mars 2016

Nom	Prénom	Organisme	Contact	Signature
DONNAREL PONT	Audrey	DREAL PACA	audrey.donnard@developement-durable.gouv.fr	
PERRIGR	Clélie	RNPF SDF	clm.perrig@cnpf.fr	
AFXANTIDIS	Denise	Faîr Méditerranéenne		
Piffaretti	Julie	Forêt Méditerranéenne		
GILLET	Chantal	Refin Pât à Secmie Forêt	cgillet@refimpaca.fr	
CHANDIOUX	Olivier	Akins	olivier.chandiaux@alkins.fr	
DAUBREZ	J. Baptiste	DRAAF DSF	jean-baptiste.daubrez@agriculture-serv.fr	
FADY	Bruno	INRA	bruno.fady@inra.fr	
LADIER	Jean	ONF	jean.ladier@onf.fr	
LEMAIRE	Jean	IDF	jean.lemaire@cnpf.fr	
Venneker	Michel	Instea	michel.venneker@instea.fr	

DENIS MARTY
Loudun

David Paulis
Camille

DRAAF
CRPF
CRPF



Relevé de décision du Comité technique du 26 Avril 2016

Membres et participants

Les membres du Comité technique sont : le RMT Aforce, l'IRSTEA, l'IDF, l'ONF, l'INRA, la DRAAF, le DSF, la DREAL, la Région PACA, l'association Forêt Méditerranéenne et les gestionnaires forestiers (Avisilva, Alcina, Coopérative Provence Forêt).

La liste des participants à ce premier comité technique est présentée en annexe de ce compte rendu.

Présentations

- ✚ L'ONF (Jean Ladier) présente l'Observatoire départemental du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes. Celui-ci comprend des placettes permanentes sur différentes essences dont le pin sylvestre, soit pour ce dernier une quinzaine de placettes avec 299 arbres suivis avec le protocole du DSF. De plus, une cartographie des mortalités observées par les agents de terrain a été établie sur l'ensemble du département, ce qui représente 12523 ha caractérisés en classe de mortalité pour le pin sylvestre.
- ✚ Le CRPF (Camille Loudun) présente les principaux résultats de l'enquête auprès des propriétaires.

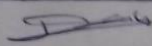

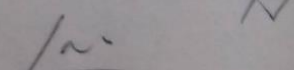
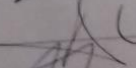
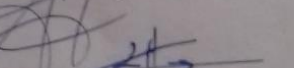
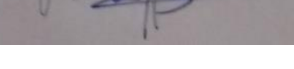

Elements discutés et décidés

Concernant le volet « recherche / développement » du projet Sylforclim, il est décidé de concevoir et tester l'outil avec les différentes données existantes sur l'état sanitaire du pin sylvestre (données sur l'indice foliaire de l'IRSTEA, données sur l'état sanitaire du DSF, données de l'Observatoire des Alpes-Maritimes sur le dépérissement des forêts).

Le volet « communication » du projet Sylforclim est également discuté notamment concernant le colloque et son contenu (intervenants, déroulés...).

LISTE DES PARTICIPANTS

Comité technique SYLFORCLIM
26 avril 2016

NOM PRÉNOM	ORGANISMES	SIGNATURE
DENIS David	DRAAF	
EXCURBE Jean Baptiste	DSF	
MARTY Pauline	CRPF	
LADIER Jean	ONF	
AFXANTIDIS Denise	Forêt Méditerranéenne	
VENNETIER Rachel	IRSTEA	
LOUDUN HAYON Camille	CRPF	



Relevé de décision du Comité de pilotage du 13 Mars 2018

Membres et participants

Les membres du Comité de Pilotage sont : le RMT Aforce, le CRPF, l'IRSTEA, l'IDF, l'ONF, l'INRA, la DRAAF, le DSF, la DREAL, la Région PACA, les Syndicats des Propriétaires forestiers, l'association Forêt Méditerranéenne, les gestionnaires forestiers (Avisilva, Alcina, Coopérative Provence Forêt, l'ASL AFAB, l'ASL de la Suberaie Varoise, enviroforesterie), les chambres d'agriculture, l'interprofession, les Communes Forestières, les Départements, les DDT, les PNR et l'association Forêt Modèle

La liste des participants est présentée en annexe de ce compte rendu.

Présentations

- ✚ Le CRPF (Pauline Marty et Alexandre Jourdan) présente un rappel des objectifs du projet et la méthode employée pour les relevés de terrain (plan d'échantillonnage, données relevées).
- ✚ L'IDF (Jean Lemaire) présente les résultats sur l'état sanitaire du pin sylvestre, les modèles établis pour mettre en avant les facteurs du dépérissement, une carte de vigilance climatique et ses modalités d'emploi.
- ✚ L'IRSTEA (Michel Vennetier) présente les résultats liés à l'étude dendroécologique (lien entre la croissance des arbres et le climat / le gui / la chenille processionnaire / l'indice topo-édaphique / la densité du peuplement / l'âge des arbres...) et ainsi les résiliences et résistances des différentes situations.
- ✚ Le CRPF présente une proposition de préconisations de gestion en vue d'une discussion avec les membres du Copil.

Elements discutés et décidés

Les résultats soulèvent différentes questions de compréhension. Mais les échanges portèrent surtout sur les préconisations de gestion présentées par le CRPF.

Les trois situations présentées pour définir les préconisations de gestion apparaissent trop simplifiées. Une clé d'aide à la décision apportant plus de nuance doit être proposée. Les critères devant rentrer en ligne de compte doivent certes être le taux de gui et la défoliation, mais il faut aussi tenir compte de la zone de vigilance climatique et de la station. Pour définir la station, il est proposé de tenir compte de l'indice topoédaphique. Cet indice apparaît toutefois compliqué à utiliser pour les gestionnaires forestiers dans le quotidien. Si l'enjeu est fort, par exemple réalisation ou non d'une plantation, l'indice topoédaphique sera bien plus facilement utilisé que s'il s'agit de faire simplement un diagnostic dans un plan simple de gestion.

Le taux de défoliation est à manier avec précaution. En effet, il peut être du à une attaque forte de chenille, ce qui biaise le résultat. Il est nécessaire d'intégrer la notion de présence de chenilles processionnaires dans la clé d'aide à la décision. Il serait prudent de prendre toute décision de transformation en dehors des périodes de pullulation de chenille.

Il est demandé à ce que la carte de vigilance climatique soit mise en ligne ou diffusée. Ses modalités d'emploi n'ont pas soulevé de questions.

Concernant le conseil de transformer les peuplements dépérissants, une nuance devra être apportée pour les stations les plus médiocres où la question de maintien ou non d'une forêt au regard des enjeux peut se poser.

L'intérêt des peuplements mélangés, des peuplements irréguliers devra être mis en avant. Toutefois, une limite est soulevé quant au mélange avec le chêne blanc qui

montre lui aussi des signes de dépérissements. Les recommandations de gestion devront aussi tenir compte des pratiques sylvopastorales fréquentes dans la région.

L'étude MedForFutur qui vise à expérimenter la plantation par enrichissement est présentée. L'enrichissement apparait en effet comme une option intéressante pour les peuplements de pin dépérissants.





Projet SYLFORCLIM

Feuille de Présence

Comité de Pilotage

Mardi 13 Mars 2018

Nom	Prénom	Organisme	Contact	Signature
CHANDOUX	Olivier	Alcina	olivier.chandoux@alcina.fr	
PITHON	Mathilde	Alcina	mathilde.pithon@gmail.com	
REBOUL	Daniel	ONF 04	daniel.reboul@onf.fr	
RETOURÉ	Catherine	Région PACA	c.retoire@regionpaca.fr 06 24 86 417	
GIRARD	Pierre	D.S.F	pierre.girard@agriculture.gouv.fr	
DUFAUD	Florian	CoFor83	boisenergie@cofor83.fr	
WAWRZYNIAK	Christine	DRAAF PACA	christine.wawrzyniak@paca.madma.gouv.fr	
TORELLI	Cécile	Département 06	ctorelli@departement06.fr	
PROVOSTO	Bernard	Iska	bernard.provosto@iska.fr	
DAUBREE	Isabelle	DSF		
VENNETIER	Ricard	IRSTEA		
PETITEAU	Marc	DDT 05	marc.petiteau@nauts-alpes.gouv.fr	
TUILLIERE	Frédéric	ONF 05	Frederic.tuilliere@onf.fr	
SAPPIA	Michel	ONF 05	michel.sappia@onf.fr	
AMANDIER	Louis	Forêt méditerranéenne	louis@amandier.com	
SOURDAN	Alexandre	CRPF	alexandre.sourdan@crpf.fr	
MILESI	Nicolas	Chambre d'agriculture 04	nicolas.milesi@chambre-agriculture-04.fr	
LOUDON	Cécile	CRPF	cecile.loudon@crpf.fr	
LADIER	Jean	ONF	jean.ladier@onf.fr	
MARTY	Pauline	CRPF	pauline.marty@crpf.fr	
LENAIRE	Jean	IDF - CNPF	jean.lenaire@idf.cnpf.fr	





Annexe 7 : Relevés de terrain

identifiant placette	Altitude	Confinement	Terrasse	Pente	Orientation	Topo_Long	Topo_Trans	Topo (BV=bas de versant/HV=haut de versant/MV=milieu de versant/P=Pl)	Affl_Roche %	Bilan_Eau (apport =a / perte =p)	Prof_Hz1	Text_Hz1	Prof_Hz2	Text_Hz2	Efferv	Elt_Gr_Hz2	Prof_Arret	pH_Hz_Ah	Arbust_E1 (Genevrier com.=G /Eglantier=E/ Buis=B/Aubépine=A /Amelanchier=Am/Viorne lan.=V/Genet cendré=Gn /Camerisier=C/Cornoiller s.=Co/Noisetier=N)	%Arbu_E1	Arbust_E2	%Arbu_E2	G_Totale(m2/ha)	Essence1 (Pin sylvestre=PS)	G_Ess1	Essence2 (Pin noir=PN, Chêne pubescent=CP, Hêtre=H, Epicea=E, Erable à feuille d'or.=Er, Mélèze=M, Alisier b.=A, Sapin p.=S.)	G_Ess2	Age	Diam moy(cm)	Ho (m)	Rayon max de prospection(m)	Remarques	
1	1350	Faible	Non	50	Z	Plane	Concave	MV	0	a = p	1	OH	34	AL	Oui	21-30	35	7		G.	5-25			24	PS	23	PN	1	40	20-40	>15	10_20	
2	1300	Non	Non	40	SO	Convexe	Plane	MV	0	p > a	7	OH	65	LA	Oui	71-80	75	7		m	5-25	Gn	1-5	23	PS	22	PN	1	80	20-40	10_15	10_20	
3	1400	Non	Non	35	SE	Plane	Plane	HV	0	p > a	7	OH	33	LAS	Oui	51-60	40	(7.5)		Gn	50-75	G.	5-25	18	PS	17	PN	1	60	10_20	10_15	10_20	Confinement Ouest
4	1000	Faible	Non	25	SO	Plane	Concave	BV	0	a >> p	6	OH	30	LA	Oui	61-70	65	(7.5)		B	75-100	G.	1-5	16	PS	16	CP		80	20-40	10_15	10_20	
5	850	Faible	Non	35	O	Convexe	Convexe	MV	1-10	p > a	7	OH	25	LA	Oui	21-30	62	8		B	75-100	Am	1-5	31	PS	31			20-40	10_15	10_20	Hz3 tres compact correspondant a de l'alterite	
6	850	Faible	Non	25	SO	Convexe	Convexe	MV	0	a > p	3	OH	20	LSA	Oui	31-40	45			G.	5-25	B	1-5	36	PS	35	CP	1	60	20-40	>15	<10	
7	900	Faible	Non	30	O	Plane	Plane	Irrég.	0	a = p	10	OH	35	L	Oui	51-60	45	8		B	25-50	Am	5-25	24	PS	24			60	20-40	10_15	10_20	Topographie irreguliere plus que plane
8	1150	Fort	Non	30	NE	Plane	Plane	BV	0	a > p	7	OH	60	L	Oui	11-20	67	8		G.	1-5	Am	1-5	18	PS	12	E	2	100	20-40	>15	20-35	topo irreguliere peuplement vieilli avec quelques jeunes
9	1100	Non	Non	75	N	Plane	Plane	HV	1-10	p > a	8	OH	22	L	Oui	31-40	30	8		B	25-50	G.	1-5	30	PS	30			60		5_10	<10	
10	1050	Non	Oui	25	E	Plane	Convexe	PLAT	0	a = p	7	OH	30	LA	Oui	51-60	37			B	5-25	Am	5-25	46	PS	46			80	20-40	10_15	<10	terrasses en cours de disparition
11	1500	Non	Non	45	S	Plane	Plane	HV	0	a = p	10	OH	30	L	Oui	11-20	40	7		B	75-100	Am	1-5	13	PS	11	CP	2			>15	10_20	Peuplement lache et irregulier
12	450	Non	Non	5	NO	Plane	Plane	PLAT	0	a = p	5	OH	15	L	Non	11-20	55	7		A	5-25	G.	1-5	25	PS	24	CP	1	80	20-40	>15	10_20	Peuplement claire suite a eclaircie
13	1000	Faible	Non	45	N	Plane	Plane	MV	1-10	a = p	10	OH	40	AL	Non	51-60	50			A	1-5	V	1-5	42	PS	41	CP	1	80	20-40	>15	<10	
14	1300	Non	Non	35	SE	Plane	Plane	MV	0	a = p	5	OH	36	AL	Oui	51-60	41	8		B	25-50	Gn	5-25	26	PS	26			80	20-40	10_15	10_20	
15	1050	Non	Non	5	SO	Plane	Plane	PLAT	0	a = p	6	OH	45	AL	Non	11-20	60	7		G.	5-25	E	1-5	36	PS	36			80	20-40	>15	<10	Situation a plat en bas de versant et non un milieu de versant
16	900	Non	Non	35	SO	Plane	Convexe	MV	1-10	a = p	2	OH	17	LA	Oui	11-20	19	7		B	50-75	G.	25-50	26	PS	26			80	20-40	10_15	10_20	placette deplacee, eloignee du point d origine
17	800	Faible	Non	35	O	Plane	Convexe	MV	0	p > a	2	OH	24	LA	Non	41-50	26			B	5-25	Am	5-25	20	PS	15	CP	5	60	20-40	10_15	10_20	placette decalée, peuplement irregulier, presence de calune
18	1050	Faible	Non	35	S	Plane	Plane	MV	0	a = p	6	OH	48	L	Oui	21-30	54	8		B	75-100	G.	5-25	31	PS	30	PN	1	60	20-40	10_15	10_20	point de remplacement
19	850	Faible	Non	25	NE	Plane	Plane	BV	0	a = p	5	OH	48	LA	Oui	11-20	48	8		B	50-75	G.	5-25	23	PS	23			40	10_20	10_15	<10	point deplace en aval
20	930	Faible	Non	25	O	Plane	Concave	BV	11-20	a > p	4	OH	32	LA	Oui	21-30	36			B	25-50	Gn	5-25	14	PS	13	PN	1	60	20-40	5_10	10_20	Beaucoup de bloc, grande heterogeneite du sol, fascies d'ancien eboulement lie a un cours d'eau
21	1180	Non	Oui	30	E	Plane	Plane	MV	0	a = p	9	OH	25	LSA	Oui	11-20	64	8		B	1-5	E	1-5	25	PS	25			80	20-40	>15	10_20	Beaucoup de tetes cassees liees a la neige (10m2/ha) et de chablis lies au vent
22	1000	Fort	Non	50	NE	Concave	Plane	BV	1-10	a > p	13	OH	32	AL	Non	41-50	45	7		B	75-100	A	5-25	17	PS	16	S	1	80	20-40	>15	10_20	
23	990	Faible	Non	75	NE	Plane	Plane	HV	0	p > a	2	OH	50	L	Oui	21-30	52			Am	25-50	G.	25-50	13	PS	13			60	10_20	5_10	10_20	peuplement moribond en cours de deperrissement, affleurement de galets. erosion active
24	1330	Non	Non	55	NE	Convexe	Convexe	HV	0	p > a	5	OH	56	SL	Oui	1-10	61			Am	1-5	V	1-5	48	PS	47	M	1	80	20-40	10_15	<10	placette deplacee
25	1260	Non	Non	40	NE	Plane	Concave	MV	0	a = p	9	OH	54	LA	Non	21-30	63	7		G.	1-5	A	1-5	33	PS	32	E	1	60	20-40	>15	<10	Placette deplacee 100m au nord, effervescence elt gr
26	1250	Fort	Non	40	NE	Plane	Plane	MV	0	a = p	9	OH	40	LA	Oui	31-40	49	8		G.	5-25	A	1-5	33	PS	27	H	6	120	20-40	>15	10_20	Nombreux pins domines par le hetre, peuplement ancien
27	1290	Non	Non	45	N	Plane	Plane	HV	11-20	a = p	5	OH	33	AL	Non	31-40	38	7		E	5-25	V	1-5	33	PS	33			80	20-40	10_15	10_20	Effervescence des elts gr,
28	1410	Non	Non	45	SO	Plane	Plane	HV	0	p > a	2	OH	47	LS	Oui	51-60	49	8		Gn	5-25	V	1-5	22	PS	22			80	20-40	10_15	10_20	Eclaircie ancienne, roche friable, paturage bovin
29	1250	Faible	Non	50	S	Plane	Plane	HV	0	p > a	5	OH	26	LS	Non	21-30	61	5		Prun.	25-50	E	5-25	24	PS	21	H	1	100	20-40	>15	10_20	Elts gr extremement friable comme de la lauze,
30	1440	Non	Non	55	O	Plane	Convexe	HV	31-100	p > a	1	OH	20	LS	Oui	41-50	21	8		G.	5-25	Am	1-5	8	PS	8			80	10_20	5_10	10_20	Sol superficiel typique des marnes, topo irreguliere
31	1440	Non	Non	75	S	Plane	Plane	MV	0	a = p	5	OH	55	LS	Oui	21-30	60	8		Gn	5-25	G.	1-5	18	PS	17	Er	1	80	20-40	>15	10_20	Presence de tuf calcaire, topo irreguliere
32	1200	Faible	Non	75	SE	Plane	Convexe	MV	1-10	p > a	1	OH	35	LA	Non	21-30	36	7		Am	5-25	G.	5-25	20	PS	14	CP	6	80	20-40	10_15	10_20	Frottis de cerf
33	1360	Fort	Non	30	SO	Convexe	Plane	MV	0	a = p	2	OH	30	LS	Oui	11-20	32	8		Gn	25-50	G.	25-50	21	PS	21			80	20-40	10_15	<10	Roche mere de type lauze tres friable, coupe recente sur peuplement adjacent
34	1120	Faible	Non	65	SO	Plane	Plane	MV	0	a = p	3	OH	66	LS	Oui	21-30	69	7		V	5-25	G.	5-25	25	PS	25			80	20-40	10_15	10_20	Milieu de versant
35	1290	Fort	Non	50	NO	Plane	Concave	BV	1-10	a > p	8	OH	40	L	Oui	51-60	47	8		Autre	50-75	G.	25-50	18	PS	18			80	20-40	>15	10_20	Arbuste E1 coronille arbrisseau, espece de ravin
36	1255	Non	Non	37	O	Plane	Plane	MV	1-10	a = p	3	OH	17	AL	Non	61-70	43			E				30	PS	30			60	20-40	10_15	10_20	
37	1450	Fort	Non	60	NE	Convexe	Convexe	BV	11-20	a > p	7	OH	32	AL	Oui	61-70	39	8		B	50-75	G.	25-50	17	PS	17			100	20-40	10_15	10_20	Placette juste au dessus d'un vallon. Quelques zones d'argiles decarbonatees
38	1165	Faible	Non	5	E	Concave	Plane	VALLEE	1-10	a > p	5	OH	41	SL	Oui	31-40	46			G.	25-50	Autre	5-25	24	PS	23	E	1	80	20-40	>15	<10	Situ topo de BV, Arbuste E2 : Argousier
39	1201	Faible	Non	8	SE	Plane	Plane	PLAT	0	a = p	2	OH	48	LS	Oui	61-70	50			G.	25-50	Autre	25-50	42	PS	42			80	20-40	>15	<10	Arbuste E2 : Troene
40	890	Non	Non	27	N	Plane	Plane	MV	1-10	a = p	4	OH	34	LA	Non	51-60	38	7		B	75-100	G.	5-25	26	PS	26			80	20-40	10_15	<10	roche mere effervescence, 6 arbres morts
41	720	Fort	Non	65	SE	Plane	Plane	MV	0	a > p	1	OH	50	LS	Oui	11-20	51	8		G.	25-50	B	5-25	16	PS	16			60	20-40	10_15	<10	texture Ls (H2), presence riviere fond de vallon
42	970	Faible	Non	20	S	Concave	Convexe	HV	0	p > a	4	OH	26	LS	Oui	31-40	30			Am	50-75	G.	25-50	26	PS	26			80	20-40	5_10	<10	regeneration ' texture H2 Ls
43	800	Faible	Non	65	E	Convexe	Convexe	HV	0	a = p	5	OH	43	L	Oui	21-30	48	8		Am	25-50	A	5-25	14	PS	14			60	20-40	5_10	<10	Topo MV, 05/04/17
44	895	Fort	Non	45	S	Concave	Plane	VALLON	1-10	a >> p	2	OH	63	L	Oui	1-10	65	8		N	25-50	Co	25-50	33	PS	24	Aulne b;	5	100	20-40	>15	<10	topo trans irreguliere. un arbre mort a terre. riviere en fond de vallon.
45	1260	Non	Non	7	SE	Concave	Concave	REPLAT	0	a >> p	3	OH	58	L	Oui	1-10	61	8		Co	5-25	G.	1-5	22	PS	19	Aulne b;	3	60	20-40	10_15	10_20	Replat avec ruisseaux.Placette deplacee.

Identifiant placette	Altitude	Confinement	Terrasse	Pente	Orientation	Topo_Long	Topo_Trans	Topo	REPLAT	Affl_Roche %	Bilan_Eau (apport =a / perte =p)	Prof_Hz1	Text_Hz1	Prof_Hz2	Text_Hz2	Efferv	Elt_Gr_Hz2	Prof_Arret	pH_Hz_Ah	Arbust_E1 (Genevrier com.=G /Eglantier=E/ Buis=B/Aubépine=A /Amélanchier=Am/Worme lan.=V/Genet cendré=Gn /Camerisier=C/Cornouiller s.=Co/Noisetier=N)	%Arbu_E1	Arbust_E2	%Arbu_E2	G_Totale (mZ/ha)	Essence1 (Pin sylvestre=PS)	G_Ess1	Essence2 (Pin noir=PN, Chêne pubescent=CP, Hêtre=H, Epicea=E, Erable à feuille d'érable=ER, Mélèze=M, Ailissier b.=A, Sapin p.=S,)	G_Ess2	Age	Diam moy(cm)	Ho (m)	Rayon max de prospection(m)	Remarques
46	1410	Non	Non	25	NO	Plane	Plane	REPLAT	0	a = p	5	OH	29	LA	Non	81-90	57	7	G.	50-75	C	1-5	34	PS	34			100	20-40	>15	10_20	1 arbre mort a terre.	
47	1400	Faible	Non	60	S	Plane	Convexe	HV	31-100	p > a	1	OH	24	LA	Oui	51-60	25		B	50-75	Gn	25-50	10	PS	9		CP	1	80	20-40	>15	10_20	Tres jolis genevriers thuriferes, 7 arbres morts a terre
48	1150	Faible	Non	75	N	Plane	Concave	BV	1-10	a > p	14	OH	41	LA	Oui	21-30	55	7	B	75-100	N	1-5	21	PS	15		A	5	100	20-40	>15	10_20	E3 : CHB, boursoufflures sur les troncs surement dues au gui,
49	1192	Faible	Non	35	N	Plane	Plane	REPLAT	0	a = p	3	OH	50	AL	Non	41-50	53	8	N	50-75	C	1-5	23	PS	16		Erable b.	6	100	20-40	>15	<10	E3 : HET
50	1530	Non	Non	35	SO	Plane	Plane	HV	0	p > a	4	OH	22	LA	Non	41-50	26	7	Gn	75-100	E	5-25	10	PS	10			40	20-40	5_10	10_20	texture: La, 3 arbres morts1	
51	900	Faible	Non	0	SE	Plane	Plane	PLAT	1-10	a > p	6	OH	39	LAS	Oui	61-70	45	8	G.	5-25	B	5-25	19	PS	19			60	oct-20	10_15	<10	zone éclairci a proximité, 1 arbre mort a terre, ruisseau temporaire	
52	1280	Fort	Non	60	NE	Concave	Plane	BV	0	a >> p	18	OH	33	SL	Oui	71-80	51	8	G.	5-25	E	5-25	11	PS	10		M	1	100	20-40	>15	<10	Presence de blocs eboules, 2 arbres morts a terre, riviere
53	1480	Faible	Non	55	O	Plane	Convexe	MV	0	a = p	4	OH	44	LA	Oui	41-50	48		G.	5-25	Am	5-25	19	PS	19			120	20-40	>15	10_20	2 vallons de part et d'autre du peuplement qui est sur une butte	
54	1600	Fort	Non	80	E	Plane	Plane	MV	31-100	a > p	3	OH	44	L	Non	21-30	47	8	G.	5-25	E	1-5	15	PS	15			80	20-40	>15	<10	5 arbres morts a terre, riviere en fond de vallon	
55	1620	Fort	Non	80	E	Plane	Plane	MV	1-10	a > p	2	OH	55	LA	Non	21-30	57	8	G.	1-5	E	1-5	18	PS	18			120		irr.	10_20	Vallon en bas mais arbres dans versant, 8 arbres morts a terre	
56	1120	Faible	Non	75	E	Convexe	Convexe	HV	31-100	p > a	4	OH	33	AL	Non	41-50	37	8	B	50-75	G.	5-25	10	PS	10			80		irr.	<10	5 arbres morts a terre, sol tres contraste avec beaucoup de couleurs	
57	1390	Non	Non	40	NO	Plane	Plane	MV	0	a > p	6	OH	65	LAS	Oui	31-100	71	8	G.	50-75	Am	5-25	21	PS	21			120	20-40	>15	10_20	Placette en bordure d'un eboulis et sous une falaise. Presence de blocs plus ou moins gros provenant de la falaise.	
58	1275	Faible	Oui	15	NO	Plane	Concave	PLAT	0	a > p	3	OH	16	LA	Non	21-30	49	7	B	5-25	A	1-5	35	PS	35			80	20-40	>15	<10	Debourrement en cours + mauvais luminosite donc decolo incertaine, gros nids de chenilles expliquant la defoliation	
59	1260	Non	Non	25	N	Convexe	Plane	HV	0	p > a	10	OH	36	AL	Non	41-50	46	8	B	50-75	G.	50-75	38	PS	38			100	20-40	>15	<10	Notation de la micro et de la decolo difficile en raison des fortes defoliations liees aux chenilles. 1 arbre mort a terre..	
60	1230	Non	Non	60	SO	Plane	Plane	MV	0	a = p	11	OH	20	SL	Non	21-30	67		B	75-100	A	1-5	17	PS	17			60	20-40	10_15	<10	Presence d'eboulis. Placette meridique !	
61	1015	Non	Non	20	SE	Convexe	Convexe	HV	0	p > a	5	OH	56	LAS	Non	11-20	61		B	50-75	G.	50-75	20	PS	20			80	20-40	10_15	<10	Placette deplacee a cause d'une exploitation.	
62	1080	Faible	Non	30	NE	Convexe	Convexe	BORD P	1-10	p > a	5	OH	24	LAS	Non	31-40	29	6	G.	1-5	V	1-5	29	PS	27		H	2	100	20-40	10_15	<10	5 arbres morts a terre, zone de morts avec regeneration
63	1440	Faible	Non	60	NO	Plane	Plane	MV	0	a = p	7	OH	50	LA	Non	61-70	57	8	G.	1-5	C	1-5	27	PS	17		S	10	140		>15	10_20	Ppt irregulier, 2 arbres morts a terre, 11-20 elt gr hz1
64	980	Faible	Non	70	O	Plane	Convexe	HV	1-10	p > a	7	OH	22	LA	Oui	61-70	29	8	B	75-100	Am	1-5	20	PS	20			80	20-40	10_15	10_20	Roche fracturee, microphyllie sur pousse 2015 mais peu sur 2016	
65	1330	Non	Non	15	NE	Plane	Plane	P	0	a = p	4	OH	30	AL	Oui	11-20	34	8	A	1-5	B	1-5	28	PS	28			80	20-40	>15	<10	Situation de plateau en limite avec une robine exposee est	
66	960	Non	Non	55	N	Plane	Plane	MV	0	a = p	8	OH	9	AL	Non	1-10	40	8	C	1-5	Am	1-5	20	PS	20			80	20-40	>15	10_20	Bas de pente avant forte pente avec robine	
67	1225	Fort	Non	45	N	Convexe	Convexe	BV	0	a > p	8	OH	45	AL	Non	11-20	53	8	C	25-50	Am	1-5	21	PS	15		H	6	120	20-40	>15	10_20	Situation de vallon sec, sous etage de hetre tres present
68	1415	Faible	Non	15	N	Convexe	Convexe	PLAT	0	a > p	7	OH	51	L	Non	41-50	58	8	G.	1-5	Am	1-5	36	PS	36			40	10_20	10_15	<10	Situation de replat avec tas de pierres.	
69	970	Non	Non	35	O	Convexe	Convexe	MV	0	p > a	7	OH	38	LA	Oui	11-20	45	8	B	75-100	G.	5-25	19	PS	18		CP	1	80	10_20	10_15	10_20	débourrement en cours
70	1700	Non	Non	55	SO	Convexe	Plane	HV	31-100	p > a	13	OH	30	LA	Oui	41-50	43	8	Gn	25-50	G.	5-25	18	PS	14		M	4	100		>15	10_20	Pedologie irreguliere, roche surement fracturee.
71	1550	Non	Non	35	SO	Plane	Concave	BV	31-100	a > p	10	OH	59	SL	Non	11-20	69	5	E	5-25	G.	5-25	16	PS	16			120		>15	10_20	Placette en situation de vallon mais sec. Plutot TPI BV. Presence de blocs de gres. Presence myrtilles.	
72	865	Fort	Non	65	N	Convexe	Plane	BV	1-10	a >> p	4	OH	66	AL	Oui	21-30	70	8	Autre	75-100	B	25-50	12	PS	12			60	10_20	10_15	<10	Sol tres heterogene avec noir, brun, ocre. Arbuste E1 coronille arbrisseau. Vallon avec petit ruisseau.	
73	1020	Non	Non	50	NE	Convexe	Convexe	HV	11-20	p > a	7	OH	29	AL	Non	41-50	36	7	B	75-100	Gn	25-50	11	PS	11			80	10_20	10_15	<10	Situation de HV. Roche fracturee. Roche effervescente. Debourrement en cours. Au moins une dizaine d'arbres morts a terre.	
74	940	Fort	Non	80	E	Plane	Plane	MV	0	a > p	6	OH	66	L	Oui	51-60	72	9	Arbre a p.	25-50	Co	25-50	21	PS	19		A	2	80	20-40	10_15	<10	Debourrement en cours. Placette au dessus d'une forte pente.
75	1690	Non	Non	80	N	Convexe	Plane	HV	1-10	p > a	7	OH	60	LA	Non	21-30	67	8	E	1-5	G.	1-5	19	PS	14		M	5	100	10_20	10_15	<10	Placette a proximite d'un ravin, presence de rege de sapin, 2 arbres morts a terre
76	1510	Non	Non	15	S	Plane	Convexe	HV	0	p > a	6	OH	24	LS	Oui	81-90	30	9	V	5-25	G.	5-25	10	PS	10			40	20-40	10_15	10_20	H2 correspondant principalement a de la lauze tres friable.	
77	1040	Faible	Non	30	SE	Convexe	Convexe	HV	0	p > a	9	OH	21	LA	Oui	51-60	30	8	G.	25-50	B	25-50	16	PS	16			60	20-40	5_10	<10	Situation de crete. 2 arbres morts a terre.	
78	1350	Non	Non	15	SO	Convexe	Plane	REPLAT	0	a = p	11	OH	37	AL	Oui	11-20	48	8	B	25-50	C	5-25	25	PS	24		H	1	120	20-40	>15	<10	replat en haut de versant
79	1420	Non	Non	80	S	Plane	Plane	MV	0	a = p	4	OH	32	LA	Oui	31-40	36	8	B	75-100	Gn	5-25	15	PS	13		PN	2	100	20-40	>15	10_20	Effervescence tres legere. Omnipresence du buis.
80	1170	Non	Non	75	O	Convexe	Plane	HV	11-20	p > a	4	OH	17	LS	Oui	51-60	21	8	Gn	50-75	Autre	25-50	13	PS	13			40	10_20	5_10	<10	Arbuste 2 : Coronille arbrisseau. Presence de pierrier par endroit.	
81	935	Non	Non	60	E	Plane	Plane	MV	0	a = p	6	OH	40	LA	Oui	21-30	46	8	B	75-100	Am	5-25	17	PS	17			60	20-40	10_15	10_20	Debourrement en cours.	
82	1050	Non	Non	70	E	Plane	Convexe	MV	1-10	a = p	5	OH	39	AL	Non	51-60	44	8	B	50-75	Am	5-25	23	PS	20		A	3	80	20-40	10_15	10_20	debourrement en cours
83	780	Faible	Non	40	NO	Convexe	Plane	REPLAT	0	a > p	6	OH	42	LS		41-50	48	7	B	25-50	G.	25-50	23	PS	23			80	20-40	>15	<10	Debourrement en cours. Roche comme du gres fin et friable mais en surface roche blanche calcaire dure.	
84	680	Faible	Non	75	E	Plane	Convexe	BV	11-20	a > p	3	OH	47	LA	Oui	31-40	50	8	B	75-100	Am	25-50	7	PS	6		Er	1	60	20-40	>15	10_20	Placette situee en fond de vallon sec mais les arbres notes remontent le long des pentes en situation sud et nord.
85	770	Faible	Non	25	N	Plane	Convexe	REPLAT	0	a > p	4	OH	52	LA	Oui	51-60	56	8	G.	5-25	Co	5-25	33	PS	32		Er	1	80	20-40	>15	<10	
86	1380	Non	Non	45	N	Plane	Plane	MV	0	a = p	7	OH	38	AL	Non	11-20	45	7	B	25-50	G.	25-50	26	PS	22		H	4	120	40-60	>15	10_20	Debourrement en cours. Roche fracturee.
87	1200	Faible	Non	30	N	Plane	Convexe	BV	21-30	a > p	5	OH	29	SL	Non	21-30	34	7	B	25-50	G.	25-50	17	PS	17			80	20-40	10_15	10_20	Roche mere cristalline probablement fracturee avec legere effervescence. Placette au bord d'un vallon sec.	
88	1375	Non	Non	50	N	Convexe	Plane	HV	11-20	p > a	3	OH	40	L	Oui	31-40	43	7	B	75-100	G.	5-25	13	PS	13			120	20-40	>15	<10	pH incertain. Roche fracturee. Effervescence tres legere	
89	1520	Faible	Non	8	E	Convexe	Convexe	PLAT	0	a > p	2	OH	43	LA	Oui	31-40	45	8	C	1-5	Am	1-5	37	PS	37			100	20-40	>15	<10	debourrement en cours placette en fond de vallon confinement nord sud	
90	1525	Non	Non	17	SO	Convexe	Plane	HV	1-10	p > a	6	OH	30	LAS	Oui	11-20	36	8	Am	5-25	E	1-5	31	PS	30		Er	1	80	20-40	>15	<10	situation de replat debourrement en cours

Annexe 8 : Caractéristiques des modèles climatiques

(Source Lemaire et Pigeon, 2015)

Aut eur	Modèle climatique	Données disponibles	Période	Avantages	Inconvénients
Météo France	<p>AURELHY</p> <p><i>(Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie)</i></p> <p>Résolution spatiale = 1 km</p>	<ul style="list-style-type: none"> - P mensuelles et annuelles - TN mensuelles et annuelles - TX mensuelles et annuelles - Nombre de jours avec P > 1 mm mensuels et annuels - Nombre de jours avec P > 5 mm et P>10 mm mensuels et annuels - Nombre de jours de gelées sous abri mensuels et annuels - Nombre de jours avec TN<-5°C, TN<-10°C, TX25°C et TX>30°C annuels 	<p>Moyenne trentenaire de 1971-2000 ; 1981-2010</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Très grand nombre de stations météorologiques impliquées dans le modèle pour la pluviométrie (3400 stations météorologiques) et la température (1500 stations météorologiques), - Variables climatiques liées aux températures et précipitations très nombreuses, - Nombreuses périodes de données, -Résolution spatiale fine 1 km 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'évapotranspiration (ETP) estimée avec cette méthode -Faible fréquence du pas de temps des données (moyenne trentenaire) - Postes de référence pour construire le modèle climatique AURELHY ne sont pas les mêmes d'une normale climatique à l'autre = impossibilité d'étudier le changement climatique. - Prise en compte partielle de la topographie (altitude et forme du relief mais pas le topoclimat
Météo France	<p>SAFRAN</p> <p><i>(Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige)</i></p> <p>Résolution spatiale = 8 km</p>	<ul style="list-style-type: none"> - TN, TX, TM 2 m au-dessus du sol - Humidité relative moyenne à 2m au-dessus du sol - Force moyenne du vent à 10m au-dessus du sol - P - P liquide - Ray infrarouge/solaire -Ray atmosphérique - ETP formule de Penman-Monteith 	<p>Données horaires de 1958 à aujourd'hui</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Données disponibles au pas de temps horaire - 8 paramètres climatiques (température, humidité, vent, précipitations rayonnement, évapotranspiration) - Fourniture de l'ETP de Penman-Monteith tenant compte de la température, du rayonnement l'humidité atmosphérique, de la vitesse du vent - Ancienneté des données (jusqu'à 1958) pour les études d'évolution climatique 	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution spatiale de 8 km qui ne permet pas la prise en compte plus fine du topoclimat comme les effets de pente et d'exposition - 615 zones climatiquement homogènes

AgroParisTech	DIGITALIS Résolution spatiale = 50 m	- P mensuelles et annuelles - Tmoy mensuelles et annuelles - Ray atmosphérique mensuelles et annuelles - ETP formule de Turc	Moyenne trentenaire de 1961-1990	- Prise en compte du topoclimat : exposition pente (MNT au pas du 50 m) pour l'évapotranspiration potentielle ; - Postes de référence pour construire le modèle climatique toujours les mêmes d'une normale climatique à l'autre.	- Faible nombre de postes météo pour la modélisation de pluviométries (437 stations météorologiques) et des températures (237 stations météorologiques) - ETP estimée selon la formule de Turc prenant en compte la température de l'air et le rayonnement. Elle ne prend pas en compte le vent et l'humidité de l'air. L'ETP est sous-estimée principalement en été.
	AURITALIS Résolution spatiale = 50 m	- P mensuelles et annuelles AURELHY - Tmoy mensuelles et annuelles AURELHY corrigée par le MNT au 50 m - Ray atmosphérique mensuelles et annuelles DIGITALIS - ETP formule de Turc	Moyenne trentenaire de 1981-2010	- Prise en compte du topoclimat : exposition pente (MNT au pas du 50 m) pour l'évapotranspiration potentielle et de l'altitude pour la température	Combinaison de deux modèles
CNPF	SAFRAUTALIS	P mensuelles et annuelles SAFRAN corrigées au km avec le modèle AURELHY - Tmoy mensuelles et annuelles SAFRAN Corrigée avec le MNT au 50 m - Ray atmosphérique mensuelles et annuelles SAFRAN corrigé avec le modèle DIGITALIS - ETP formule de Turc	Données mensuelles de 1981 à 2016	- Données journalières - Prise en compte du topoclimat : exposition pente (MNT au pas du 50 m) pour l'évapotranspiration potentielle et de l'altitude pour la température	Combinaison de modèles

ETP utilisée dans les modèles

Le bilan hydrique climatique (P-ETP) est un indicateur bioclimatique beaucoup utilisé dans les études agronomiques et forestières. Il permet d'estimer les besoins en eau de la plante et s'avère particulièrement intéressant dans les études d'impact de la sécheresse en région méditerranéenne. Il correspond à la différence entre les apports d'eau par les pluies (précipitations, P) et les besoins en eau du végétal (évapotranspiration potentielle, ETP). L'évapotranspiration potentielle correspond à la quantité d'eau maximale (en mm/jour) que peut restituer dans l'atmosphère un couvert végétal en pleine activité physiologique et en conditions non limitatives d'approvisionnement hydrique (Thornthwaite, 1948).

Parmi les différentes formules d'ETP existantes (Thornthwaite, Turc, Hargreaves, PenmanMonteith), c'est la formule de l'ETP de Turc (1961), donnée par l'équation qui suit, qui est utilisée dans les modèles:

$$ETP \left(\frac{\text{mm}}{n \text{ jours}} \right) = n * 0,013 * (Rg + 50) * \left(\frac{t}{t + 12} \right)$$

n = période considérée

t = température moyenne de l'air de la période (°C)

R_g = rayonnement global en cal/cm²/jour

Bien que cette formule ne prenne pas en compte les effets du vent et le déficit de saturation de l'air, elle est simple d'emploi et assure une bonne prise en compte de la latitude et de la topographie grâce à un couplage température-rayonnement. Elle dispose, de plus, de paramètres mesurables sur le terrain ou disponibles à une échelle assez fine. Par exemple nous ne pourrions pas utiliser la formule de Penman-Monteith car elle nécessite de connaître la vitesse du vent ou l'albédo, des paramètres non disponibles à l'échelle de nos placettes. La formule de Turc est encore utilisée dans le secteur forestier pour le calcul de bilan hydrique climatique, notamment par le CNPF (Lemaire & Maréchal, 2011) ou par les chercheurs d'AgroParisTech (Lebourgeois & Piedallu, 2005).

Annexe 9 : Variables utilisées dans les analyses statistiques

Les variables en gras correspondent à des variables calculées, celles normales à correspondent à des variables mesurées. Les mentions « données SIG » indique que les variables ont été obtenues à partir des modèles spatialisés.

Identifiants de la placette
Paramètres topoédaphiques
Paramètres dendrométriques
Paramètres sanitaires
Paramètres climatiques

VARIABLE	DESCRIPTION
id	identifiant de la placette
SAFRAN	identifiant du point SAFRAN
XL93	Coordonnées longitude Lambert 93 – <i>données SIG</i>
YL93	Coordonnées latitude Lambert 93 – <i>données SIG</i>
XLII	Coordonnées longitude Lambert II étendu – <i>données SIG</i>
YLII	Coordonnées latitude Lambert II étendu – <i>données SIG</i>
Alt	Altitude (m) – <i>données SIG</i>
Pente	Pente (%)
Exposition	Exposition (%)
TPI	Position topographique de la placette dans la pente – <i>données SIG</i>
Bilan_H2O_position	Position topographique de la placette dans la pente - <i>donnée de terrain</i>
IKR	Indice lumineux de Becker
Confinement	Absent, faible, fort
Terrasse	Placette situé sur une terrasses (oui, non)
Orientation	Degré
Topo_Long	Forme de la topographie longitudinale (plan, convexe, concave)
Topo_Trans	Forme de la topographie transversale (plan, convexe, concave)
Text_Hz1	Texture de l'horizon 1
Text_Hz2	Texture de l'horizon 2
RU	Réserve utile
Affl_Roche	Affleurement de la roche mère (%)
Efferv_Hz2	Effervescence à l'HCL horizon 2 (0,1)
Prof_Arret	Profondeur d'arrêt (cm)

pH_Hz	pH horizon
Indice_topo_edaphique	Traduit le bilan hydrique édaphique et la fertilité de la placette
Arbuste_E1	Nom de l'espèce d'arbuste prédominante
%Arbu_E1	% d'occupation du sol de l'arbuste prédominant
G_Totale	Surface terrière
Dm_moy	Diamètre moyen des arbres de la placette
Gui_moy	Proportion de présence de gui (%) sur la placette = moyenne des proportions du houppier actifs colonisés par du gui
Gui_classe	Statut de la placette en fonction de la proportion de gui supérieure ou inférieure à 10% du houppier (GUIfaible ou GUIsup10)
PP_moy	Nombre moyen de nids de chenille processionnaires par arbre sur la placette
Decolo_moy	Décoloration moyenne du feuillage sur la placette (%)
Micro_moy	Proportion moyenne d'aiguilles microphylles sur la placette
defol_moy	Défoliation moyenne des arbres sur une placette (%)
defol_c0	% d'arbres en classe 0 selon protocole DEFIFOL (défoliation entre 0 et 5% du houppier)
defol_c1	% d'arbres en classe 1 selon protocole DEFIFOL (défoliation entre 0 et 25% du houppier)
defol_c2	% d'arbres en classe 2 selon protocole DEFIFOL (défoliation entre 26 et 50% du houppier)
defol_c3	% d'arbres en classe 3 selon protocole DEFIFOL (défoliation entre 51% et 75% du houppier)
defol_c3+	% d'arbres en classe 3+ selon protocole DEFIFOL (défoliation entre 76 et 95% du houppier)
defol_c4	% d'arbres en classe 4 selon protocole DEFIFOL (défoliation entre 96% et 100% du houppier)
tx_mortalite	Proportion d'arbres morts sur la placette (identifiés avec une défoliation égale à 100%)
tx_depe_50	Proportion d'arbres de la placette possédant une défoliation supérieure à 50%
Depe_20	Statut déperissant de la placette si taux_depe_50 > 20% (sain20 ou depe20)
Tmoy01	Température moyenne du mois de janvier – données SIG
Tmoy02	Température moyenne du mois de février – données SIG
Tmoy03	Température moyenne du mois de mars – données SIG
Tmoy04	Température moyenne du mois d'avril – données SIG
Tmoy05	Température moyenne du mois de mai – données SIG
Tmoy06	Température moyenne du mois de juin – données SIG
Tmoy07	Température moyenne du mois de juillet – données SIG
Tmoy08	Température moyenne du mois d'août – données SIG
Tmoy09	Température moyenne du mois de septembre – données SIG
Tmoy10	Température moyenne du mois de octobre – données SIG
Tmoy11	Température moyenne du mois de novembre – données SIG
Tmoy12	Température moyenne du mois de décembre – données SIG
TX0608	Température moyenne maximale des mois de juin-juillet-août – données SIG
Tmoy	Température moyenne annuelle – données SIG
P_an	Pluviométrie moyenne annuelle – données SIG
P0608	Pluviométrie moyenne des mois de juin-juillet-août – données SIG
P0509	Pluviométrie moyenne des mois mai-juin-juillet – données SIG
P0410	Pluviométrie moyenne de la saison de végétation (avril à octobre) – données SIG
ETPanTURC	Evapotranspiration potentielle annuelle selon la formule de Turc – données SIG
P_ETP_an	Bilan hydrique climatique moyen annuel (Précipitation-Evapotranspiration) – données SIG
P_ETP0608	Bilan hydrique climatique moyen sur les mois de juin à août – données SIG
P_ETP0509	Bilan hydrique climatique moyen sur les mois de mai à septembre – données SIG
P_ETP0410	Bilan hydrique climatique moyen sur les mois d'avril à octobre – données SIG

Annexe 10 : Projet d'outil utilisable sur le terrain



BIOCLIMSOL pour le Pin sylvestre en PACA

Outil d'aide au diagnostic et à la gestion des peuplements dépérissants

De nombreux peuplements de pin sylvestre montrent des signes de dépérissement en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Cet outil, destiné aux gestionnaires et propriétaires forestiers, fournit des éléments d'aide à la décision pour gérer les peuplements de pin sylvestre dans le contexte actuel du changement climatique.

Mode d'emploi :

- 1 – Réaliser un diagnostic
- 2 – Identifier le cas de figure dans lequel on se situe grâce à la clé
- 3- Prendre connaissance des recommandations de gestion concernant son cas de figure

Etape 1 : Diagnostic

ETAT SANITAIRE

- Défoliation du houppier notable (houppier hors concurrence)⁴

A estimer en pourcentage par rapport à un arbre pleinement folié de référence, et cela de manière visuelle en se basant sur les photos standards ci-dessous :

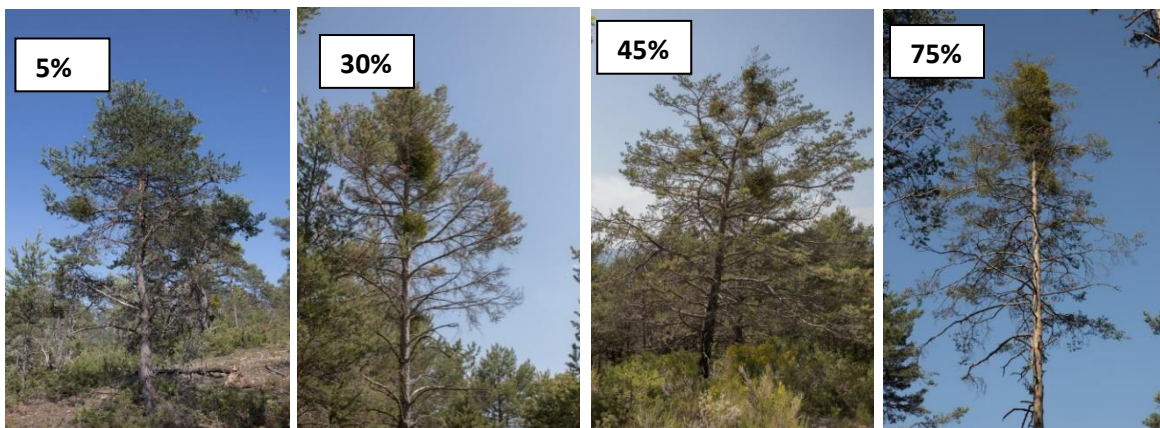


Estimer le pourcentage d'arbres ayant plus de 50% de défoliation.

- Nids de chenilles processionnaires

Les noter pour une vingtaine d'arbres, puis calculer le nombre moyen de nids par arbre.

- Proportion de gui dans le houppier fonctionnel en pourcentage d'occupation du houppier par rapport au feuillage. A estimer en pourcentage par rapport à un arbre pleinement folié sans gui, et cela de manière visuelle en se basant sur les photos standards ci-dessous :

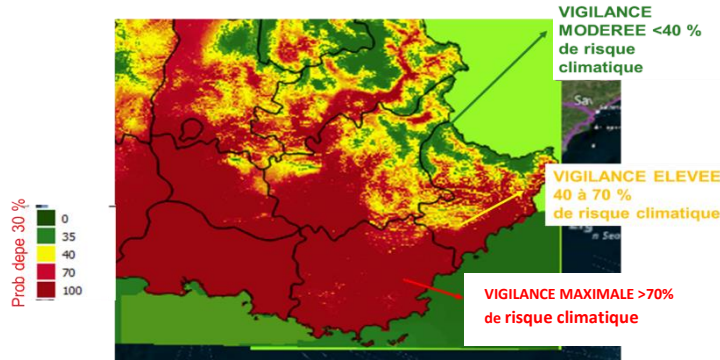


⁴ L'estimation de la défoliation est basée sur le protocole DEFIFOL du Département Santé des Forêts.

ZONE DE VIGILANCE CLIMATIQUE

Identifier si la vigilance par rapport au risque de dépérissement lié au climat est modérée, élevée ou maximale

Attention, il est nécessaire pour cela d'utiliser la carte de vigilance sous un SIG (la carte papier n'est pas assez précise). La carte est téléchargeable à l'adresse suivante : xxxxxx.



Attention, la carte n'est pas utilisable en elle-même, avant de tirer des conclusions il est nécessaire de compléter le diagnostic en tenant compte des conditions stationnelles.

CONDITIONS STATIONNELLES

Calcul de l'indice topo-édaphique⁵ en remplissant la grille ci-dessous :

		facteurs défavorables				facteurs neutres			facteurs favorables					
TOPOGRAPHIE	topographie générale	sommet	croupe	-14	haut de pente	-6	pente	-3	plateau	0	bas pente	10	vallon	18
	topographie stationnelle				convexe	-8			plan	0	concave	8		
	banquettes								absence	0	présence	13		
	pente du terrain						> 27° ou 50%	-1	< 27° ou 50%	0				
ROCHE	affleurement rocheux		>= 30%	-8	10 - 30%	-3	1 - 10 %	-1	0	0				
	affleurement de cailloux				>= 30%	-3	10 - 30%	-2	1 - 10 %	0	0	2		
	pendage / pente (sur altérite et colluvion < 80 cm)						défavorable	-1	neutre	0	favorable	1		
	Diaclases (sur altérite et colluvion < 80 cm et pendage défavorable ou neutre)						absentes	-2	quelques	0	nombreuses	3		
MATÉRIAU	matériau de référence	roche		-4	altérite	-2	lapiaz	-1			colluvium	5		
	HCl terre						forte	-2	faible	0	nul	3		
	éléments grossiers		>= 90%	-7	60-90%	-3			30-60%	0	< 30 %	4		
	plaquettes horizontales				présentes	-6			absentes	0				
	réserve utile / texture **		<= 0,7mm/cm	-10	1 à 1,3	-3			1,35 à 1,6	0	1,7 à 1,95	5	2	10
PROFONDEUR	épaisseur de la colluvion				absent	-2	5-20 cm	-1	25-50 cm	0	> 50 cm	3		
	profondeur totale		0-20 cm	-12	25-45 cm	-5			50-75 cm	0	75-100	5	> 100 cm	10
	tests tarière						0-20 cm	-2	21-40 cm	0	41-75cm	2	> 75 cm	3

indice topo-édaphique	=		+		+		+		+		+	
-----------------------	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

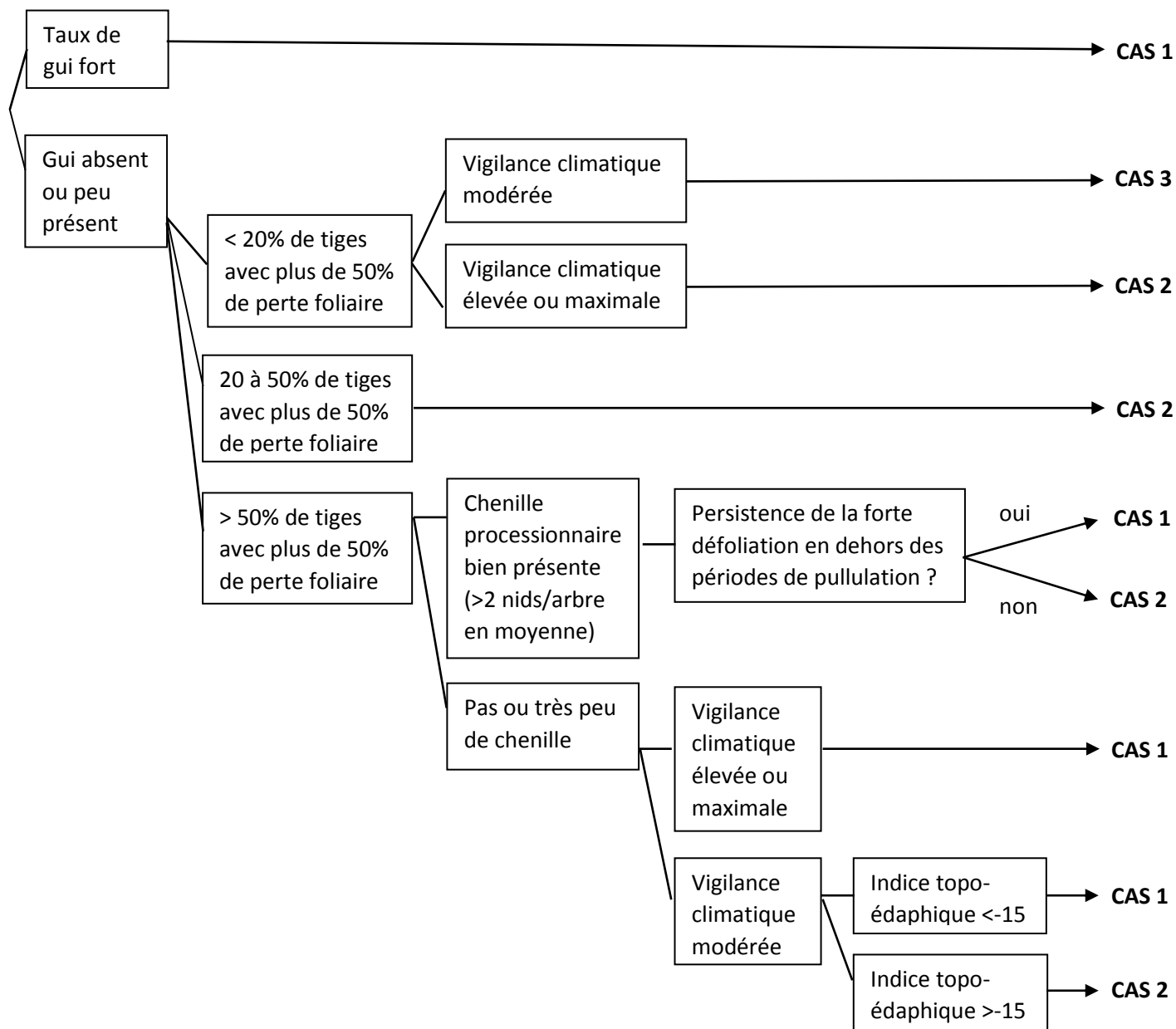
CARACTERISTIQUES DENDROMETRIQUES

Estimer l'âge du peuplement

Evaluer la surface terrière ou la densité du peuplement

⁵ Indice établi par l'IRSTEA

Etape 2 : Clé des différentes situations



Le taux de gui est considéré comme fort si son taux de recouvrement dans l'ensemble des houppiers du peuplement est en moyenne supérieur à 10%, et faible sinon.

Etape 3 : Recommandations de gestion

Ces recommandations sont liées à la clé ci-dessus.

CAS 1 :

Il s'agit des cas de **fort dépérissement** du pin sylvestre. Cette essence n'ayant pas d'avenir à terme dans ces conditions, il est conseillé de tendre progressivement vers une transformation du peuplement afin de changer d'essence.

Toutefois, en cas de présence d'au moins 100 tiges/ha ayant un avenir possible (tiges bien développées, non gitées et ne présentant pas une forte perte foliaire), il est encore possible de réaliser des éclaircies à leur profit avant d'envisager la transformation.

Pour tendre vers la transformation :

-des éclaircies ciblées peuvent favoriser à terme et de manière progressive l'apparition de nouvelles essences. De plus, ces éclaircies ciblées viseront à éliminer les arbres les plus gûités;
- l'introduction d'essences par reboisement en plein ou enrichissement permettra une évolution plus rapide.

Pour les très mauvaises stations (crêtes,...), on pourra s'interroger sur la pertinence d'investir dans un boisement compte tenu des faibles enjeux de production de bois et de la prédominance des autres fonctions de la forêt.

CAS 2

Ces cas correspondent à des **situations intermédiaires** où le pin sylvestre montre des signes notables de dépérissements mais est encore capable de résilience. Ces situations peuvent aussi être des cas sans signe de dépérissement actuel mais dans une situation à risque du point de vue climatique.

L'objectif va être avant tout de gérer le pin sylvestre afin de le faire perdurer en maintenant sa productivité. Toutefois, comme les stress hydriques risquent de se répéter de plus en plus, ce type de situation risque fort de n'être qu'une situation de transition qui basculera ensuite dans le type précédent « fort dépérissement ». Il est alors conseillé de favoriser aussi les autres essences pour tendre le plus possible vers un peuplement mélangé.

La gestion du pin sylvestre doit dans ce cas-là viser :

- une augmentation de sa résistance au stress hydrique (les éclaircies notamment sont favorables, ainsi que la mise en régénération des arbres âgés moins résistants) ;
- le maintien et l'arrivée d'autres essences.

Les interventions suivantes sont donc à favoriser :

- => *Renouveau des arbres de plus de 80-100 ans*
- => *Eclaircies en traitement régulier ou irrégulier fréquentes et orientées. Elles doivent éliminer en priorité les arbres gûités, maintenir les autres essences en place ainsi que des arbres jouant le rôle d' « arbres parasols ». Ces derniers sont des arbres au houppier bien développé qui constitue un ombrage pour les autres arbres réduisant ainsi leur vulnérabilité au stress hydrique.*
- => *Coupes permettant l'arrivée progressive d'une régénération de pin et d'autres essences*

Les interventions suivantes sont à éviter :

- => *Non intervention*
- => *Coupes sylvopastorales en maintenant uniquement des arbres âgés (>80 ans). En effet, ces derniers seront amenés à dépérir et ne pourront plus assurer un renouvellement du peuplement lorsque les bêtes seront enlevées. L'activité pastorale peut être mise en place au sein de jeunes peuplements (20-50 ans).*
- => *Une seule coupe de régénération sans éclaircie préalable.*

CAS 3

Il s'agit des **cas les plus favorables** : aucun signe de dépérissement n'est constaté aujourd'hui et la vigilance climatique est modérée. Il est envisageable de poursuivre avec le pin sylvestre en menant une gestion classique. Toutefois, avec le risque accru de sécheresse, il est conseillé d'être vigilant et d'observer le peuplement pour y diagnostiquer une éventuelle défoliation. Notamment, si du gui est constaté sur certaines tiges, il s'agira de les prélever en priorité.

De plus, avec le vieillissement, les arbres actuellement jeunes ou d'âge moyen deviendront de plus en plus sensibles aux stress hydriques, et d'autant plus qu'ils seront denses. En raison des risques de sécheresses extrêmes qui augmenteront dans le futur, il faut maintenir ces peuplements à des densités modérées.

La gestion en peuplement irrégulier peut aussi permettre d'augmenter la résilience grâce au maintien permanent d'arbres plus jeunes moins sensibles.