

Table des matières

Table des matières	6
Liste des figures	8
Liste des Tableaux	10
Liste des abréviations.....	11
Introduction.....	1
1. Contexte de l'étude	2
1.1 Le réchauffement climatique.....	2
1.2 Une modification des massifs forestiers sous l'effet du changement climatique	3
1.2.1 La notion de dépérissement forestier	3
1.2.2 L'impact observé du changement climatique sur les massifs forestiers	4
1.2.3 Impacts attendus du réchauffement climatique sur les massifs forestiers au cours du prochain siècle	5
1.3 Contexte environnemental et socio-économique de la région PACA.....	5
1.3.1 Le relief et le climat de la région	5
1.3.2 Les étages bioclimatiques	7
1.3.3 Les principales formations forestières de la région (d'après IFN, 2010)	8
1.3.4 Les enjeux du Pin sylvestre.....	8
1.4 L'autoécologie du pin sylvestre	9
1.4.1 Distribution	9
1.4.2 Altitude – Exposition	11
1.4.3 Topographie et sol.....	11
1.4.4 Ravageurs et pathogènes.....	11
1.4.5 Génétique et adaptation.....	12
1.5 Le dépérissement spécifique du Pin sylvestre en région PACA	12
1.5.1 Les constats récents de dépérissements dans la région.....	12
1.5.2 Les facteurs de dépérissement identifiés dans la littérature.....	14
1.6 Problématique et démarche	15
1.6.1 Objectif général.....	15
1.6.2 Les hypothèses de travail	16
1.6.3 La démarche adoptée	16
2. Matériel et Méthodes	17
2.1 Zone d'étude, échantillonnage et relevés de terrain	17
2.1.1 Plan d'échantillonnage.....	17

2.1.2	Relevés de terrain.....	19
2.2	Les données climatiques.....	21
2.2.1	Données climatiques disponibles et choix des données.....	21
2.2.2	Choix de la formule d'ETP.....	24
2.3	Traitement des données.....	25
2.3.1	Caractérisation du dépérissement dans l'étude.....	25
2.3.2	Traitement SIG et correction d'échelle.....	25
2.3.3	Analyses statistiques.....	26
3.	Résultats.....	27
3.1	Réponse de la défoliation aux variables utilisées dans l'échantillonnage.....	27
3.2	Carctérisation de l'état sanitaire des placettes et relations simples de la défoliation et de la mortalité avec différents facteurs.....	29
3.2.1	Caractérisation de l'état sanitaire des placettes.....	29
3.2.2	Relations simples de la défoliation et de la mortalité avec différents facteurs.....	31
3.3	Détermination d'un modèle explicatif multifactoriel du dépérissement.....	33
3.3.1	Comparaison des modèles « défoliation » et « taux de mortalité ».....	33
3.3.2	Les variables significatives retenues dans le modèle « défoliation ».....	34
3.3.1	Le modèle « gui ».....	35
3.3.2	Classification des variables explicatives du dépérissement.....	36
3.1	Cartographie du modèle retenu.....	38
4.	Discussion.....	40
4.1.1	Importance de la défoliation mesurée en PACA.....	41
4.1.2	La part des variables climatiques dans la défoliation.....	41
4.1.3	Les variables prépondérantes dans le modèle de défoliation.....	42
4.1.4	Le gui.....	42
4.1.5	Les chenilles processionnaires.....	43
4.1.6	La topographie.....	43
4.1.7	Validation des hypothèses.....	44
4.1.8	Limites de l'étude.....	45
	Conclusion et perspectives.....	45
	Bibliographie.....	47
	Annexes.....	51

Liste des figures

Figure 1: Evolution des températures annuelles en région PACA de 1980 à nos jours par décennies (Source : Safran Météo France, résolution 8x8km)	3
Figure 2: Bilan hydrique climatique (P-ETP) mensuels de 1995 à 2006 calculé selon le méthode de Thornwaite au niveau de la station météorologique de Catellane Provence-Alpes-Côte d’Azur (Source : Thabeet, 2008).....	6
Figure 3: Carte de répartition du cumul des précipitations estivales 1961-1987/1997-2012 (Source : Météo-	7
Figure 4: Carte de distribution du Pin Sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i> L.) (Source:Durrant <i>et al.</i> , 2016)	9
Figure 5: Répartition régionale du Pin Sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i> L.) en région Provence-Alpes-Côte-d’Azur (Source: IFN, 2010)	10
Figure 6: : Réponse du Pin sylvestre à quelques paramètres climatiques (Source: Masson, 2005 ; Forêt Wallone, 1015)	10
Figure 7: Évolution du déficit foliaire moyen pour le Pin sylvestre dans les principaux massifs montagneux français, mesuré sur les placettes du réseau systématique de surveillance du DSF. Les notes sont moyennées à l’échelle des placettes d’un massif. (Source :Thauvin, 2011, issu des données du DSF 2011).....	13
Figure 8: Localisation des placettes de Pin sylvestre échantillonnées, distribuées selon un gradient altitudinal et climatique dans la région Provence-Alpes-Côte-D’azur	17
Figure 9: Position topographique et topographie locale (Source : Ripert & Vennetier, 2002)	20
Figure 10: <i>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</i>	28
Figure 11: Moyennes des variables attestant du dépérissement des peuplements pour une placette moyenne en PACA (en pourcentage d’occupation du houppier).	29
Figure 12: Effectifs des placettes par taux de défoliation moyen de leurs houppiers (en %) (n=89) et correspondance avec la classification DEFIFOL.....	29

Figure 13: Effectifs des placettes en fonction de leur taux de mortalité (en n=89).	30
Figure 15: Effectif de placettes en fonction du nombre moyen de nids par arbre	30
Figure 14: Effectif de placettes en fonction du taux d'infestation des houppiers par le gui	30
Figure 16: Comparaison des taux de mortalité en fonction du taux de défoliation des placettes.	31
Figure 17: Comparaison des taux de défoliation en fonction des classes d'altitudes	31
Figure 18: Comparaison du taux de défoliation des placettes selon leur indice topo-édaphique .	32
Figure 19: Relation linéaire simple entre le taux de présence de gui (%) et le taux de défoliation moyen.....	32
Figure 20: Comparaison des modèles explicatifs du dépérissement avec les variables "défoliation" ou "taux de mortalité" utilisées comme variables cibles par régression PLS.	34
Figure 21: Résultats de la PLS appliquée à la variable cible "Gui_moy"	35
Figure 22: Classification des variables explicatives de la variable depe20 par la méthode C.4.536	
Figure 23: Classification des variables explicatives de la variable GUI_CLASSE par la méthode C.4.5	37
Figure 24: Résultats de la régression logistique appliquée à la variable GUI_CLASSE	38
Figure 25: Carte de probabilité de présence de gui à un taux supérieur à 10% en fonction du PETP0410 (Bilan hydrique climatique d'Avril à Octobre sur la moyenne trentenaire 1981-2010)	39
Figure 26: Zoom sur la carte de probabilité de présence de gui à un taux supérieur à 10% en fonction du PETP0410 (Bilan hydrique climatique d'Avril à Octobre sur la moyenne trentenaire 1981-2010).....	39

Liste des Tableaux

Tableau 1: Déficits pluviométriques annuels sur la période 2003-2007 en région Provence-Alpes-Côte d’Azur (<i>Source: Vennetier et al., 2008</i>).....	6
Tableau 2: Caractéristiques des étages bioclimatiques des montagnes méditerranéennes (<i>Source : Corriol, n.d. </i>)	7
Tableau 3: Récapitulatif des forces et faiblesses du Pin sylvestre.....	12
Tableau 4: Comparaison des données disponibles pour spatialiser les données climatiques (<i>Source: Lemaire et Pigeon, 2015</i>).....	23

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales

CNPF : Centre National de la Propriété Forestière

DSF : Département de Santé des forêts

ETP : Evapotranspiration potentielle

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

IDF : Institut de Développement Forestier

IKR : Inde lumineux de Becker

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

ONF : Office National de Forêts

PACA : Provence-Alpes-Côte d'Azur

PLS : Partial Least Squares

PP : Chenille Processionnaire du Pin

RCP : Representative Concentration Pathway

SIG : Système d'Information Géographique

TPI : Topographic Position Index

Introduction

Des ralentissements de la croissance des arbres sont parfois observés sur plusieurs années dans les massifs forestiers, conduisant parfois à des mortalités, sans qu'une cause unique ne puisse être clairement identifiée. On parle alors de dépérissement forestier. De plus en plus de cas de dépérissements affectant diverses essences, dans toutes les régions du monde sont répertoriés (Allen *et al.*, 2010). Tous ces dépérissements génèrent une inquiétude croissante chez les gestionnaires forestiers (Riou-Nivert, 2007; Legay & Ladier, 2008), d'autant plus qu'un réchauffement climatique « sans précédent » est constaté depuis le dernier siècle (GIEC, 2007). Ainsi parmi les douze dernières années, onze années ont été classées comme étant les années les plus chaudes depuis 1850 et les températures de l'air ont augmenté d'en moyenne 0,74°C sur la période 1901-2000 (GIEC, 2007). Des questions se posent alors sur le lien qui pourrait exister entre les phénomènes de dépérissements observés actuellement et l'évolution du climat.

Depuis la fin du XIXe siècle dans la région méditerranéenne, la forêt est en expansion, suite à l'abandon des terres provoquée par l'exode rural et le développement de l'industrie. Cette expansion forestière opère sous la dynamique d'essences pionnières telles que les pins ou le Mélèze, puis d'autres essences qui s'installent sous leur couvert comme pour le Hêtre ou le Sapin pectiné à l'étage montagnard, pour venir constituer une forêt mature. Cette dynamique est particulièrement marquée dans la région Provence-Alpes Côte d'Azur (PACA), où le taux de boisement est aujourd'hui 20% supérieur à la moyenne nationale (IFN, 2010). La surface en Pin sylvestre dans la région a ainsi été multipliée par huit en une centaine d'années (Barbero & Quézel, 1990), pour atteindre environ 250 000 ha cette dernière décennie. L'essence se place aujourd'hui au premier rang régional en termes de production en volume de bois.

La forêt PACA, et notamment le Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), de par la surface qu'il occupe, ont désormais une place importante dans l'économie régionale. La forêt joue localement des rôles écologiques et patrimoniaux non négligeables tels que la protection contre les risques naturels, la protection des sols, des eaux, de la biodiversité, le stockage du carbone, l'identité des paysages locaux ou encore l'économie de filière bois locale. Le Pin sylvestre constitue dans les Alpes du Sud d'importants boisements de protection (Sardin, 1997). Cependant les nombreux constats de dépérissements observés sur cette essence depuis la canicule 2003 sont préoccupants, notamment dans le Sud de la France (Pyrénées et Alpes du Sud). Afin de mieux en comprendre la cause et l'évolution, un observatoire des dépérissements forestiers a été mis en place par l'Office national des forêts (ONF) dans le département des Alpes-Maritimes depuis 2008. Ce suivi montre une constante augmentation de la défoliation du Pin sylvestre sur le département. Plusieurs études ont démontré un lien entre le réchauffement climatique le dépérissement du Pin sylvestre dans la région PACA (Thabeet, 2008 ; Vennetier *et al.*, 2008 ; Thauvin, 2011).

Depuis quelques années, des données spatialisées sont acquises sous forme de cartes numériques, par différents instituts (Météo-France, AgroParisTech, LERFob Nancy). Ils permettent d'estimer les variables climatiques moyennes (précipitations, températures, rayonnement solaire, évapotranspiration, bilan en eau...) en tout point du territoire et à différentes échelles de temps.

Grâce aux variables modélisées disponibles et aux jeux de données collectées sur le terrain qui caractérisent le dépérissement, nous tenterons donc d'améliorer l'analyse du déterminisme des dépérissements du Pin sylvestre. En particulier, nous tenterons d'évaluer la part du changement climatique dans les dépérissements de cette essence à l'échelle de la région PACA par rapport aux effets des caractéristiques des peuplements et des conditions stationnelles.

Ce rapport introduit dans un premier temps un point sur le changement climatique et les dépérissements forestiers, puis traite du cas spécifique du dépérissement du Pin sylvestre en région Provence-Alpes Côte d'Azur. Les hypothèses testées dans l'étude sont ensuite détaillées avant de présenter les données utilisées et la méthodologie mise en œuvre. Les résultats obtenus sont alors présentés avant d'être discutés.

1. Contexte de l'étude

1.1 Le réchauffement climatique

« Le climat actuel connaît un réchauffement sans équivoque », telle est la conclusion tirée du quatrième rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) paru en 2007 concernant l'évolution du climat. Au XX^{ème} siècle, la terre a connu un réchauffement d'en moyenne 0,74°C. Le cinquième rapport du GIEC (2014) atteste avec plus de certitude encore (probabilité 95%), la part des activités humaines et notamment l'usage des énergies fossiles comme première cause du réchauffement planétaire actuel. Ce dernier rapport en date présente également les derniers scénarios, nommés « RCP », réalisés par la communauté scientifique, se basant sur des profils d'évolutions possibles des concentrations de l'atmosphère en gaz à effet de serre, ozone et précurseurs d'aérosols. Ainsi, en fonction du scénario, on peut s'attendre à une augmentation des températures de 0,3°C à 4,8°C au cours du XXI^{ème} siècle, par rapport à la période 1986-2005. L'ensemble des scénarios sont équiprobables : il n'est pas possible à ce jour d'affirmer que l'un d'entre eux est plus plausible que les autres (ONERC, 2013).

La région méditerranéenne est caractérisée par un climat sec, avec des étés chauds où les précipitations sont rares voire inexistantes et des hivers très doux. Elle est particulièrement exposée au réchauffement climatique, on parle parfois de « hot spot ». Les cartes présentées figure 1

montrent de manière générale l'augmentation des températures moyennes annuelles dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur depuis 1960 par comparaison des périodes décennales. On constate que l'arrière-pays méditerranéen connaît une remontée vers le Nord des fortes températures depuis 1960. Le climat de la région est décrit plus bas (Cf § 1.3.1).

Températures moyennes annuelles (°) par décennie

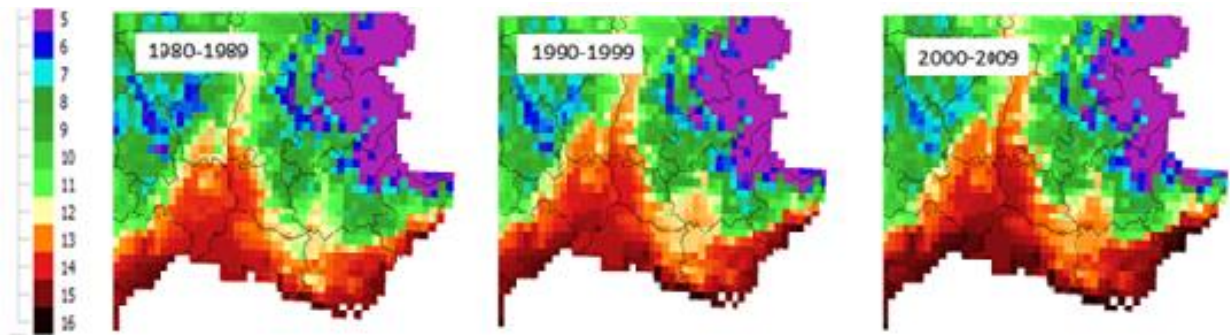


Figure 1: Evolution des températures annuelles en région PACA de 1980 à nos jours par décennies (Source : Safran Météo France, résolution 8x8km)

1.2 Une modification des massifs forestiers sous l'effet du changement climatique

Il n'est pas possible d'ignorer ces constats et prévisions d'évolution climatique lorsque l'on raisonne à l'échelle de la vie d'un arbre. Les peuplements forestiers ont un temps de vie long, et sont particulièrement sensibles à des changements de climat, même prévus sur des pas de temps de plusieurs dizaines d'années. Au cours du XXI^e siècle, on pourrait assister dans beaucoup de régions à une hausse du taux de mortalité des arbres et au dépérissement des forêts, ce qui constitue une menace pour le stockage du carbone, la biodiversité, la production de bois, la qualité de l'eau, les aires d'agrément et l'activité économique (GIEC, 2014). De plus, les effets indirects de ce réchauffement sont notamment les risques accrus d'incendies, d'invasion d'animaux nuisibles et d'épidémies.

1.2.1 La notion de dépérissement forestier

Le dépérissement est défini comme un phénomène causé par un ensemble de facteurs interagissant et se succédant d'une façon particulière, qui entraîne une détérioration générale et graduelle de l'arbre et se traduit par des symptômes portant notamment sur l'aspect et la croissance tels que des réductions de la quantité et de la qualité du feuillage, des réductions de croissance voire des mortalités d'organes pérennes (Manion, 1981). La mortalité de l'arbre n'est pas systématique. La mortalité désigne un arbre qui ne présente aucun signe de vie au-dessus de 1,30m, et toujours sur pied, cassé ou non au niveau de sa tige ou de son houppier (IFN, 2010).

Le dépérissement est un phénomène évolutif et progressif qui fait intervenir trois échelons successifs de facteurs : prédisposants, déclenchants et aggravants, interchangeableables selon les espèces et les régions (Manion, 1981; Annexe 1). La complexité du phénomène réside dans son caractère multidimensionnel, il se définit ainsi par opposition aux baisses de vitalité provoquées par une seule cause biotique ou abiotique (Landmann, 1994). Pour le Département de Santé des Forêts (DSF), il convient en effet de ne pas considérer comme dépérissants des arbres qui ont uniquement un dommage aux feuilles lié à une cause simple temporaire tel qu'un gel, une canicule, une attaque de chenilles ou de champignons (DGAL, 2010). Ces phénomènes complexes soulèvent de nombreuses interrogations chez les gestionnaires et propriétaires forestiers.

1.2.2 L'impact observé du changement climatique sur les massifs forestiers

La physiologie et la croissance des essences forestières est fortement liée à la température et à la disponibilité en eau du sol (Bontemps *et al.*, 2005; Charru *et al.*, 2010; Nemani *et al.*, 2014). La température influe entre autre sur la durée de la période de végétation par un débourrement précoce ou un retard la chute des feuilles (Menzel, 2003). Les précipitations, combinées aux températures et aux conditions édaphiques locales, déterminent le stock d'eau disponible pour les arbres, ainsi que la vitesse à laquelle ce stock s'épuise et se reconstitue (Bréda *et al.*, 2006).

Les cas de grands dépérissements forestiers dans la littérature scientifique au cours des 15 dernières années ont été multipliés par trois, avec plus de 200 cas répertoriés sur cette période, concernant tous les continents et tous les types de forêts (Allen *et al.*, 2010). Néanmoins, l'observation des forêts a considérablement progressé durant cette période et le nombre de pays disposant de moyens significatifs de gestion forestière et de suivi a aussi augmenté. Bien que les dépérissements puissent se produire en l'absence du changement climatique, les nombreuses études réalisées sur le sujet suggèrent qu'au moins une partie des écosystèmes forestiers y réagissent de façon avérée (Allen *et al.*, 2010; Vennetier, 2012). De plus, le climat détermine fortement la dynamique des agents pathogènes et des ravageurs. Le manque de froid génère une survie généralisée des populations jusque-là décimées par le gel, celles-ci se reproduisent alors de manière exponentielle (Berg, *et al.*; 2006; Vennetier, 2012). La détérioration des conditions hydriques pour les arbres (stress hydrique, voire sécheresse) sous l'effet du réchauffement diminue leur résistance naturelle face aux attaques biotiques. Même les arbres les plus vigoureux peuvent ne pas survivre dans ces conditions (Vennetier, 2012).

Les forêts du bassin méditerranéen sont particulièrement affectées. Le déficit en eau est le principal facteur limitant de la croissance de la végétation dans la région, augmentant les risques de dépérissements forestiers et la mortalité des arbres. Et si certaines essences adaptées au climat de la zone s'y trouve encore accommodé (Pin d'Alep, Pin noir), d'autres, déjà en marge de leur aire de répartition comme le Pin sylvestre, arrivent en limite de leur capacité d'implantation face à

l'évolution du climat. (Vennetier *et al.*, 2008). Les constats inquiétants de dépérissements faits sur le Pin sylvestre en région PACA font l'objet d'une description plus bas dans le rapport (Cf §1.5).

1.2.3 Impacts attendus du réchauffement climatique sur les massifs forestiers au cours du prochain siècle

Etant donné que l'échelle d'accélération du réchauffement attestée dans le rapport 2014 du GIEC va se produire dans un délai inférieur à la durée de vie de la plupart des espèces d'arbres, les massifs forestiers vont connaître des dépérissements importants en limite basse et sud de l'aire de répartition des espèces, le renouvellement naturel n'ayant pas le temps de s'effectuer (Vennetier, 2012). Ainsi on assisterait à une redistribution en latitude et altitude des aires de distribution des essences de plusieurs centaines de kilomètres vers le nord et de plusieurs centaines de mètres en altitude (Keller *et al.*, 2000; Badeau *et al.*, 2005; Lenoir *et al.*, 2008; Nogués Bravo *et al.*, 2008). Le Pin sylvestre se trouve en limite méridionale de son aire de répartition au niveau du bassin méditerranéen et se présente donc comme une espèce particulièrement concernée par cette problématique. Les variations de la répartition sur le gradient altitudinal seraient plus rapides pour les espèces dont l'aire de répartition est restreinte aux habitats montagneux (Lenoir *et al.*, 2008; Nogués Bravo *et al.*, 2008), ce qui est le cas pour le Pin sylvestre, et donc d'autant plus rapides en région chaudes et montagneuses comme dans l'arrière-pays méditerranéen et les Alpes-du-Sud, où environ 60% des essences disparaîtraient d'ici 2085 (Thuiller, 2005)

1.3 Contexte environnemental et socio-économique de la région PACA

1.3.1 Le relief et le climat de la région

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 période estivale sèche marquée, des hivers doux et la grande 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 prolonger les effets de la canicule. La répartition des déficits pluviométriques annuels par rapport à la moyenne trentenaire 1981-2010 est donnée par le tableau 1.

Tableau 1: Déficits pluviométriques annuels sur la période 2003-2007 sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Source: Vennetier et al., 2008)

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

Le détail des données de bilan hydrique mensuels de 2000 à 2006 montre l'importance des déficits hydrique sur les mois d'été, en particulier en 2003 (Figure 2).

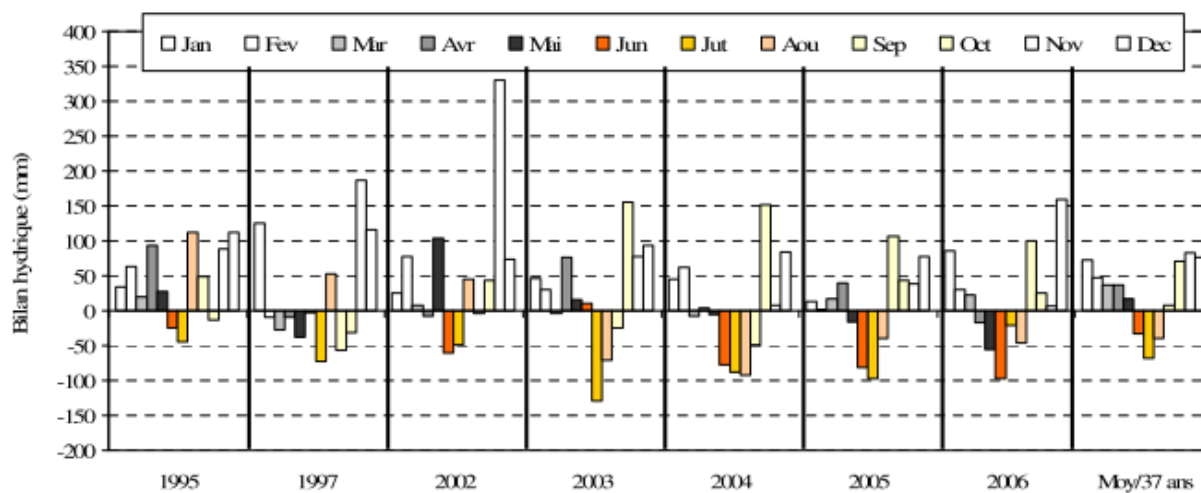


Figure 2: Bilan hydrique climatique (P-ETP) mensuels de 1995 à 2006 calculé selon le méthode de Thornwaite au niveau de la station météorologique de Castellane Provence-Alpes-Côte d'Azur (Source : Thabeet, 2008)

La carte présentée figure 3 montre les anomalies climatiques spatialisées du déficit pluviométrique accru dans la région PACA sur la période trentenaire 1981-2010.

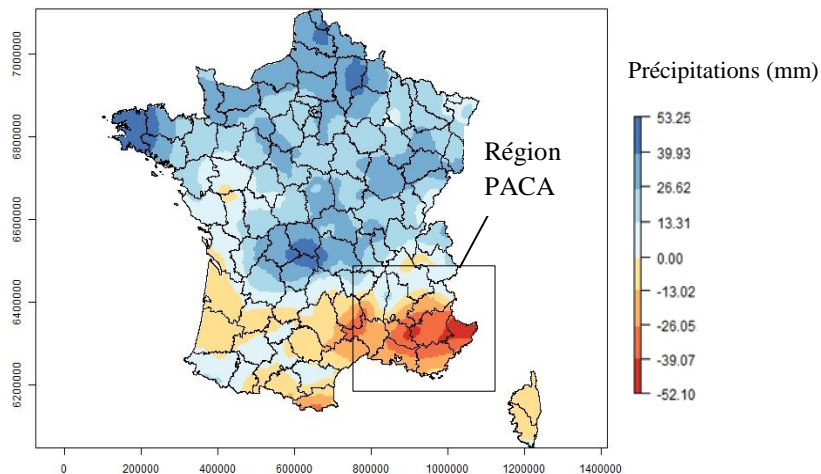


Figure 3: Carte de répartition du cumul des précipitations estivales 1961-1987/1997-2012 (Source : Météo-

1.3.2 Les étages 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, détaillés tableau 2. Dans la région, des étages de végétation associés au climat méditerranéen (thermo-méditerranéen, méso-méditerranéen et supra-méditerranéen) et des climats plus tempérés (montagnard, subalpin et alpin) se superposent.

Tableau 2: Caractéristiques des étages bioclimatiques des montagnes méditerranéennes (Source : Corriol, n.d.)

Etage	T° moy annuelle	T° moy minimale du mois le plus froid	Précipitations moyennes annuelles	Végétation naturelle dominante	Caractéristiques
<i>Altitude (m)</i> <i>(Ubac/Adret)</i>					
Subalpin <i>[1800m ; 2500m] /</i> <i>[1850m ; 2500m]</i>	De -2°C à +4°C	De -7°C à -4°C	900mm - 1000mm	Pineraies Pin à crochet	Période de végétation <200J
Montagnard <i>[1000m ; 1800 m] /</i> <i>[1200m ; 1850 m]</i>	De 4°C à 8°C	De -5°C à -1°	800-900mm	• Hêtraies-Sapinières • Sapinières-Pineraies	Disparition des espèces les plus exigeantes en chaleur
Supra-méditerranéen <i>[450m 1000m] /</i> <i>[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] /</i> <i>[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

1.3.3 Les principales formations forestières de la région (d'après IFN, 2010)

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) s'étend sur 31 399 km². Le taux de boisement du territoire (48 %), soit environ 1 517 000 ha de forêt, est largement supérieur à la moyenne nationale (29 %). C'est la seconde région française la plus boisée après la Corse. Ce taux masque cependant une forte hétérogénéité entre les départements. Trois essences dominent la région : le Pin sylvestre (250 000 ha), le Chêne pubescent (220 000 ha) et le Pin d'Alep (200 000 ha). Le Chêne vert (100 000 ha) et le Mélèze (77 000 ha) sont aussi des essences bien représentées. Le Chêne pubescent et le Pin sylvestre forment à eux deux près de la moitié des peuplements monospécifiques de la région. Le mélèze d'Europe est l'essence pour laquelle la part de peuplement pur est la plus importante en région PACA (71 %). Le mélange de Pin sylvestre et de feuillus représente la plus grande part (23 %) des peuplements mélangés de la région. La part occupée par le Pin sylvestre dans la région souligne l'importance de s'intéresser à cette essence.

1.3.4 Les enjeux du Pin sylvestre

1^{ère} essence forestière en région PACA en termes de superficie avec 250 000 ha, le Pin sylvestre constitue une quantité de bois conséquente à valoriser, équivalente à 27 Mm³ répertoriés en forêt de production (IFN, 2010). La croissance de l'essence et la qualité du bois étant moins bonnes que dans d'autres régions non soumises à la chaleur et la sécheresse, la part destinée au bois d'œuvre (qualité supérieure) est moindre. Il ne fait donc pas l'objet de pratiques de sylvicultures approfondies. Mais il présente des enjeux économiques pour la valorisation de bois de qualité inférieure : le Pin sylvestre possède un débouché dans le bois de trituration, pour la papeterie notamment. Il est aussi exploité en bois énergie pour le bois de chauffage. En 2011, 175 petites et moyennes chaudières étaient en activité en région PACA pour une consommation d'environ de bois de 40 000 t/an, dont la moitié issue de coupes forestières. Mais l'apparition récente de centrales à biomasse dans la région a conduit à augmenter la demande en bois de chauffage, accrue d'au moins un facteur 15 (DREAL, 2015), contribuant à l'augmentation du prix du bois. L'unité biomasse de la centrale thermique de Gardanne, datant de 2012, est calibrée pour brûler 850.000 t/an de bois. Parallèlement, la centrale de Brignole (Var, 83), inaugurée en 2016, représente une consommation de 180 000 tonnes annuelles, dont 140 000 prélevées sur la forêt provençale dans un rayon d'une centaine de kilomètres.

D'autre part, le Pin sylvestre présente des enjeux environnementaux pour la biodiversité et la protection des forêts. Cette espèce de lumière offre notamment une protection pour le développement d'espèces ombrophiles, elle contribue à la protection contre l'érosion des sols, là où d'autres essences ne pourraient pas se développer. Cette quantité de biomasse constitue aussi un puits de carbone pour aider à lutter contre le réchauffement climatique. Enfin, un dépérissement massif de l'essence contribuerait à augmenter le volume de biomasse hautement combustible, intensifiant les incendies. Il est donc important de se poser la question du devenir de ces pinèdes sylvestres qui couvrent de larges étendues en PACA.

1.4 L'autoécologie du pin sylvestre

1.4.1 Distribution

Le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) est une espèce pionnière, elle 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. (Figure 4). Cette large amplitude écologique lui permet d'être présente dans les peuplements dominants de plusieurs étages de végétation (Vennetier & Ripert, 2010), son optimum écologique se situant dans l'étage montagnard. Par conséquent en France, le Pin sylvestre est essentiellement présent dans les Pyrénées, le Massif central, les Alpes et les Vosges.

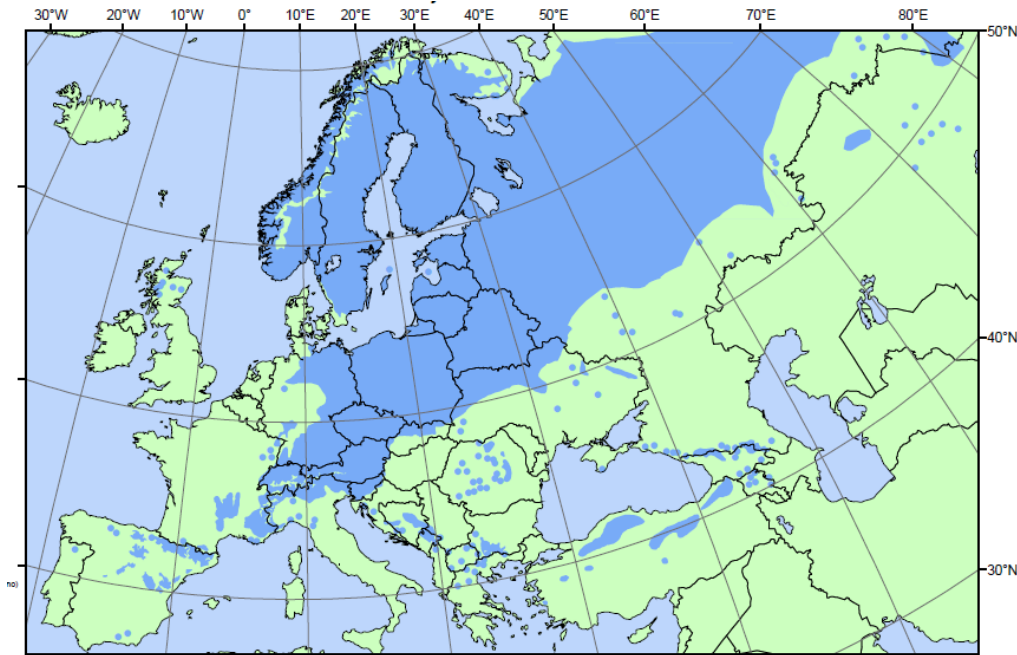


Figure 4: Carte de distribution du Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) (Source:Durrant *et al.*, 2016)

Dans le bassin méditerranéen, l'essence est surtout présente dans la portion occidentale (Portugal, Espagne, France), où elle reste cantonnée en montagne subméditerranéenne. Sa répartition en région PACA est présentée figure 5. Ce Pin 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 (Barbéro & 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)

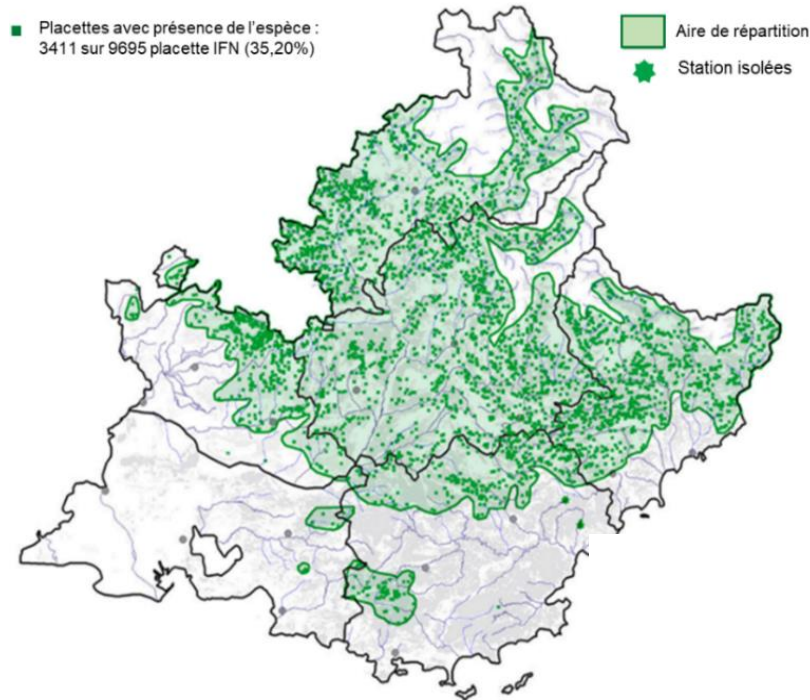


Figure 5: Répartition régionale du Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (Source: IFN, 2010)

Climat

Le Pin sylvestre est une essence adaptée à une large gamme de climats (Barbéro *et al.*, 1998; Masson, 2005). La réponse de l'essence aux températures et à la pluviométrie sont données figure 6.

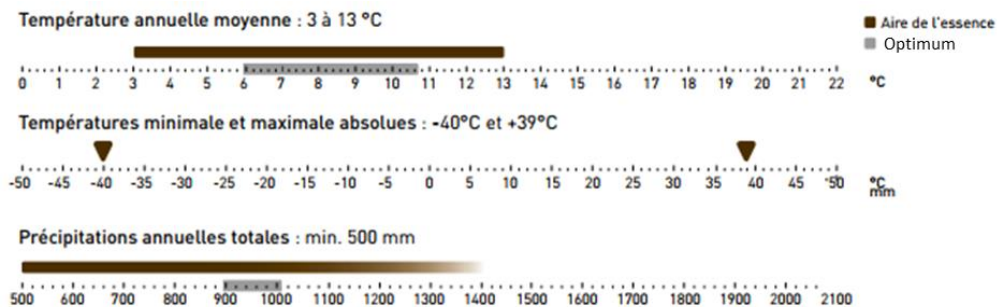


Figure 6: Réponse du Pin sylvestre à quelques paramètres climatiques (Source: Masson, 2005 ; Forêt Wallone, 1015)

Le Pin sylvestre ferait partie des résineux résistants à la sécheresse, probablement grâce à une fermeture précoce des stomates (Bréda *et al.*, 2006). Il ne serait pas impacté par une augmentation des températures et une diminution des précipitations lors de la saison de végétation (Forêt Wallone, 2015). Cependant de récentes études montrent une sensibilité de l'essence aux

épisodes d'extrêmes climatiques (Keller *et al.*, 2000; Martínez-Vilalta & Piñol, 2002), notamment comme lors des périodes de canicule en région méditerranéenne (Thabeet, 2008; Galiano *et al.*, 2010; Vennetier, 2012).

1.4.2 Altitude – Exposition

La gamme d'altitude occupée par le Pin sylvestre va de 500 à 1800m (Ladier, 2004), 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 de manière générale (Masson, 2005), même si on le trouve souvent en adret, probablement en raison d'une concurrence moindre de la part des autres essences forestières (ONF, 2016). Dans la région méditerranéenne, il est essentiellement présent à l'étage montagnard où il remplace le Hêtre et le Sapin dans les stations sèches (Alexandrian, 1992). Il est également très abondant dans 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).

1.4.3 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).

1.4.4 Ravageurs et pathogènes

L'essence est sensible à des pathogènes tels que la rouille courbeuse, le rouge cryptogamique des aiguilles de pin sur les parties aériennes, ou encore l'armillaire sur les parties racinaires. Ils induisent respectivement une baisse de la productivité, une dévalorisation du bois et une mortalité possible d'arbres adultes (Forêt Wallone, 2015). Le bostryche typographe et le sténographe sont des insectes ravageurs des pins en général et peuvent être vecteurs de champignons pathogènes (Durrant *et al.*, 2016). Le charançon est un coléoptère problématique chez les pins, pouvant provoquer de la mortalité (Durrant *et al.*, 2016; Forêt Wallone, 2015). La processionnaire du pin, particulièrement virulente ces dernières années, peut favoriser le dépérissement du pin (Hóðar *et al.*, 2003) Forêt Wallone, 2015). Enfin, le gui est un parasite affectant le Pin sylvestre, qui peut causer du dépérissement voir de la mortalité chez le Pin sylvestre (Dobbertin *et al.*, 2005)

1.4.5 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 intra spécifique 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 même une activité cambiale bloquée lors de la sécheresse estivale et une réaction négative face aux précipitations automnales. Une hybridation avec le Pin à crochet semblerait possible, des individus intermédiaires ayant été signalés dans les Alpes du Sud. Huit taxon distincts sont généralement considérés en région méditerranéenne dont quatre présents en Espagne.

Le tableau 3 récapitule les capacités du Pin sylvestre dans son environnement.

Tableau 3: Récapitulatif des forces et faiblesses du Pin sylvestre

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none">- Essence pionnière- Essence frugale- Peu sensible aux gelées, précoces comme tardives- Satisfait d'une période de végétation réduite- Essence robuste vis-à-vis des sols difficiles : accepte les sols très acides/compacts- Résistant à un engorgement temporaire- Peu sensible à la sécheresse climatique et édaphique	<ul style="list-style-type: none">- Vent/neige/verglas- Engorgement permanent- Sol calcaire- pH basique- Concurrence interspécifique- Chenilles processionnaires- Faible productivité en comparaison aux autres résineux- Canicule

1.5 Le dépérissement spécifique du Pin sylvestre en région PACA

1.5.1 Les constats récents de dépérissements dans la région

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 ; Annexe 2). 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 (Figure 7). 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 dans ces évolutions. La question du lien entre ces évolutions et celles mises en évidence pour le climat se pose alors.

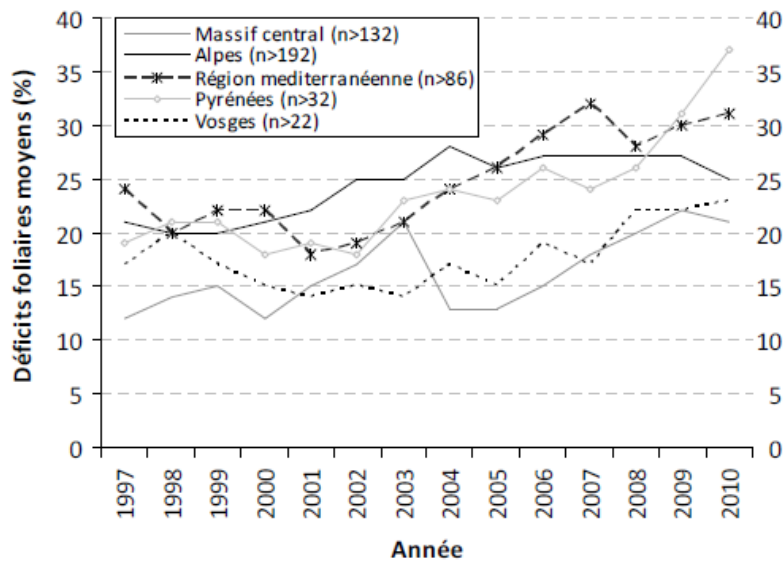


Figure 7: Évolution du déficit foliaire moyen pour le Pin sylvestre dans les principaux massifs montagneux français, mesuré sur les placettes du réseau systématique de surveillance du DSF. Les notes sont moyennées à l'échelle des placettes d'un massif. (Source :Thauvin, 2011, issu des données du DSF 2011)

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 combinés à une séquence pluriannuelle de déficits hydriques élevés (Cf §1.3.1) : les Pins sylvestres ont présenté une importante mortalité dans les montagnes de basse Provence et dans l'arrière-pays méditerranéen. Les symptômes de cette mortalité différée sont un dessèchement et un jaunissement progressif des aiguilles du haut vers le bas du houppier, indices d'un fort déficit hydrique. 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).

A partir de 2003, le Pin sylvestre montre une réponse négative au niveau de la croissance radiale, qui a même été stoppée net au cours du printemps. Les années sèches consécutives qui ont suivi, en 2004, 2005 et 2007 ont encore affaibli les arbres, conduisant à une diminution de la croissance (cernes très étroits, déficits foliaire, déficit de fructification, microphyllie, croissance en hauteur et en diamètre très faible) et à un dépérissement extensif, visible par imagerie satellitale, (Thabeet, 2008).

Depuis 2008, l'Observatoire du dépérissement des forêts des Alpes-Maritimes procède à un suivi des dépérissements du Pin sylvestre 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 (tous les 3 ans). La carte des mortalités de l'essence en 2011 sur le département est présentée annexe 3. 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).

1.5.2 Les facteurs de dépérissement identifiés dans la littérature

Facteurs climatiques

Si le Pin sylvestre est généralement considéré comme une essence résistante à la sécheresse, ce caractère a été remis en cause, notamment dans sa limite d'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).

Facteurs stationnels

L'importance des variables telles que l'altitude et l'exposition dans les dépérissements de Pin sylvestre ont été mis 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) (Thabeet, 2008), 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 sur des expositions de secteurs 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.

Gui

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.

Insectes défoliateurs

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

1.6 Problématique et démarche

1.6.1 Objectif général

Lien entre recherche et gestion

La mortalité forestière est un domaine prioritaire de recherche pour les écologistes et les scientifiques étudiant le changement climatique, pour informer et supporter les décisions politiques et les pratiques de gestion forestière (Allen *et al.*, 2010). La rapidité d'adaptation des forêts face à l'évolution du climat reste incertaine pour ces écosystèmes ayant un long cycle de production. Cette incertitude doit pousser à définir des stratégies d'adaptation et à orienter les modes de gestion. Les différentes essences forestières ne répondant pas toutes de la même manière face au changement climatique (phénologie, migration, symptômes), il est important d'analyser la réponse spécifique de chacune au climat moyen ainsi qu'aux événements climatiques extrêmes pour évaluer correctement leur vulnérabilité.

Avec une occupation de 250 000ha sur la région PACA, le Pin sylvestre implique des enjeux économiques, environnementaux et patrimoniaux non négligeables pour la région. Les dépérissements de Pin sylvestre constatés ces quinze dernières années dans la région méditerranéenne - qui constitue la limite méridionale de son aire de répartition - génèrent de fortes inquiétudes : d'une part pour l'avenir de cette essence au vue du réchauffement climatique prédit par les scénarios publiés par le GIEC (2014), d'autre part pour les risques accrus d'incendies d'une biomasse dépérissante sèche, enfin pour les implications économiques concernant la région. Mais le peu d'études réalisées sur les paramètres exacts du dépérissement de cette essence dans la région PACA nous conduit à mener cette étude. Nous avons donc cherché à améliorer la caractérisation du déterminisme du dépérissement du Pin sylvestre à l'échelle de la région, en évaluant la part des variables liées au climat, au regard des variables liées aux caractéristiques des peuplements et aux conditions topographiques et édaphiques des stations.

Le développement de l'outil BioClimSol

L'étude, financée dans le cadre du programme RMT Aforce, s'inscrit dans le projet BioClimSol qui est un outil d'aide à la décision développé par le CNPF à l'issue d'un projet commun

à l'Institut du Développement Forestier (IDF) et aux Centres Régionaux de la Propriété Forestière (CRPF). Ce projet est né suite à l'augmentation des demandes de coupes sanitaires dérogatoires aux Plans Simples de Gestion recensées en Pays de la Loire et Poitou-Charentes dans les chênaies atlantiques (Lemaire & Maréchal, 2011). Cet outil s'appuie sur des cartes de vigilance climatique propres aux exigences de chaque essence, visant à prédire le risque de dépérissement pour chacune d'elle, dans un contexte de changement du climat. L'objectif est d'obtenir un outil numérique couplé à un diagnostic de terrain, aidant le gestionnaire forestier à l'échelle de la parcelle, dans ses préconisations sylvicoles ou dans ses choix d'essences pour le reboisement (Lemaire, 2014). Ces cartes ont déjà été réalisées pour plusieurs essences : Chênes sessile et pubescent, Sapin, Châtaignier, Cèdre, Douglas. Il s'agirait alors d'étendre cet outil à l'essence du Pin sylvestre qui n'a pas encore été traitée.

1.6.2 Les hypothèses de travail

Au regard de l'ensemble des éléments exposés dans le contexte, le travail sera articulé autour de la question de recherche suivante : Peut-on déterminer quels sont les facteurs prépondérants dans le phénomène multifactoriel du dépérissement du Pin sylvestre en PACA via l'observation de leur état sanitaire ? Nous formulons deux hypothèses de travail nous permettant de nous aider à y répondre :

H1 : Le climat possède un impact majeur sur le dépérissement du Pin sylvestre en PACA à basse altitude en lien avec des variables liées à la sécheresse.

H2 : Les agents biotiques possèdent un impact majeur dans le dépérissement du Pin sylvestre en affaiblissant les peuplements, qui sont de plus soumis au réchauffement climatique.

1.6.3 La démarche adoptée

La démarche adoptée consiste dans un premier temps à déterminer les facteurs prépondérants dans le phénomène de dépérissement du Pin sylvestre parmi des critères climatiques, édaphiques, topographiques, dendrométriques et biotiques, en donnant un poids à chacun des facteurs identifiés. Le but est d'établir un modèle prédictif à partir des observations faites sur les parcelles d'échantillonnage de l'étude, sous la forme d'un indice qui permette par la suite au forestier de définir si une station est favorable ou non à l'essence et s'il y a un risque, à terme, d'y trouver du dépérissement. Le modèle construit n'est pas un modèle de niche. Il s'agit d'un modèle définissant le risque d'observer du dépérissement en fonction des conditions biotiques et abiotiques rencontrées sur le terrain. Les risques identifiés à partir du modèle retenu seront ainsi spatialisés dans le but d'élaborer une carte de vigilance du dépérissement de l'essence. La modélisation de ces risques, via l'indice et la carte, contribuera à terme à élaborer un outil d'aide à la décision aidant les forestiers dans leurs pratiques de gestion face au changement climatique.

2. Matériel et Méthodes

2.1 Zone d'étude, échantillonnage et relevés de terrain

2.1.1 Plan d'échantillonnage

Zone d'échantillonnage

L'étude a été conduite dans la région PACA, de Janvier à Mai 2017, sur quatre-vingt-dix placettes de Pin Sylvestre en peuplement dominant (Figure 8). 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) : les formations végétales y sont délimitées grâce à un travail de photo-interprétation à partir de couverture aérienne infrarouge. La sélection des placettes a été réalisée au sein d'une maille systématique de 50m de côté appliquée à l'échelle des parcelles de Pin sylvestre présentes sur la région PACA. 150 points ont été retenus dans un premier temps, de façon aléatoire en répondant aux critères de stratification, les placettes étant définies par leur coordonnées géographiques prises au centre des mailles. Seules quatre-vingt-dix placettes ont ensuite été gardées, le reste des points servant de points de remplacement en cas de rejet de la placette si celle-ci ne répond pas aux critères de l'échantillonnage. La zone correspondant au Mercantour n'a pas été échantillonnée pour ces relevés de terrain, une étude réalisée par l'ONF sur les Alpes- Maritime (06) y ayant déjà été réalisée.

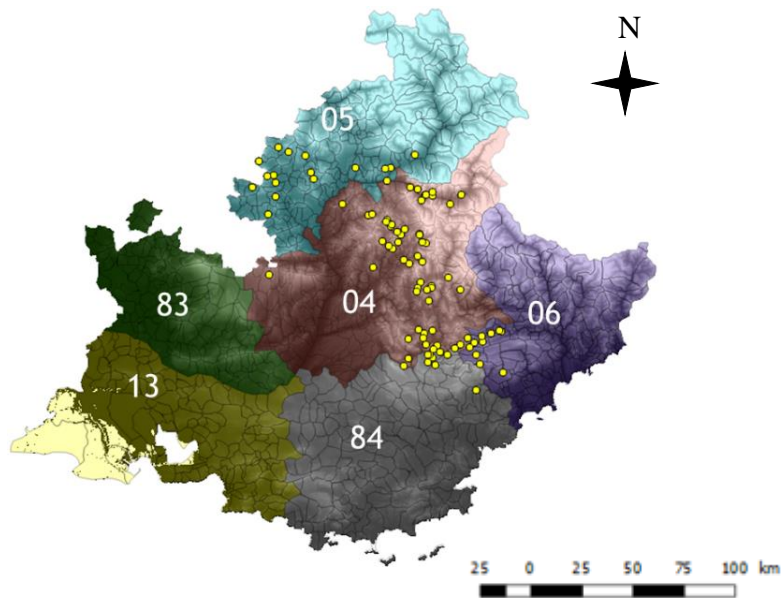


Figure 8: Localisation des placettes de Pin sylvestre échantillonnées, distribuées selon un gradient altitudinal et climatique dans la région Provence-Alpes-Côte-D'azur

Critères des classes de l'échantillonnage

Dans cette maille, la sélection suit un échantillonnage stratifié par classes de vigilance définies par l'altitude, la position topographique et l'exposition. Les critères de classe pour chacun de ces trois paramètres ont été définis à partir des seuils de dépérissement identifiés par l'ONF (2016), ainsi que par Thabeet (2008), qui a étudié la réponse du Pin Sylvestre aux changements climatiques récent en région méditerranéenne à partir de données de télédétection et de dendrochronologie. Des dépérissements plus importants ont été détectés à basse altitude, en haut de versant, ainsi que sur les versants frais. De ce fait, l'échantillonnage de notre étude a été réalisé de façon équilibrée selon les critères suivants :

- (a) altitude (>1200m / > 1200m)
- (b) IKR (<0.9 frais / 0.9-1.07 neutre/ >1.07 chaud)
- (c) TPI (<-0.8 bas de versant ou fond de vallée / (-) 0.8 - (+) 0.8 milieu de versant / >0.8 haut de versant ou crête

L'IKR désigne l'indice de climat lumineux défini par (Becker, 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). C'est une variable intéressante dans les études de milieu en région méditerranéenne, qui permet une meilleure prise en compte de la pente et de l'exposition ensemble. L'indice a été calculé à partir des pente et exposition mesurées sur le terrain.

L'indice se calcule par la formule suivante :
$$ikr = \frac{\sin(C - \arctan(pente * \cos(exposition)))}{\sin(C)}$$

Où la pente et l'exposition sont exprimés en radians, et où C est une constante dépendant de l'inclinaison moyenne annuelle des rayons du soleil par rapport à l'horizontal.

Plus la station est exposée sud avec une pente forte plus l'IKR est élevé (station chaude), plus une station est exposée nord avec une pente forte plus l'IKR est faible (station froide). Une station plane et horizontale aura un IKR égal à 1.

Le TPI (Topographic Position Index) mesure la position topographique relative d'un point par rapport à la différence d'altitude entre son altitude et l'altitude moyenne des points voisins. Cet indice permet de classer le paysage en classes de position dans la pente. C'est un indicateur morphométrique qui s'avère intéressant pour des analyses de topographie. Il dépend spécifiquement de la résolution du MNT. Il a ici été déterminé par SIG sur le MNT au 25m avec un rayon de 100m à l'aide du TPI proposé par GDAL de Qgis. Il permet de dégager les grandes formes de relief. La classification du TPI utilisée est celle de Weiss (2001), elle est reprise dans les bornes du TPI de notre échantillonnage (c).

Cas de rejet des placettes

Suite à la sélection des 90 placettes dans la maille systématique, l'opérateur sur le terrain se doit de rejeter une placette si elle présente l'un ou plusieurs des critères suivants :

- Signe d'exploitation forestière inférieure à 10 ans
- Hauteur du peuplement inférieure à 3m de hauteur ou diamètre inférieure à 10cm
- Moins de 4 Pins sylvestres dominants dans un rayon de 15m

En cas de rejet de la placette ou d'inaccessibilité à la placette, l'opérateur se rend 50 m au nord du point GPS initial, il l'installe en ce point. S'il n'y a pas présence de Pin sylvestre ou que 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 100m aucune placette de mesures ne peut être installée, la placette retenue est rejetée. Quand la placette est rejetée, l'opérateur sélectionne une placette remplaçante située à proximité, et dans la même zone de vigilance climatique, et ce à l'aide du fichier SIG.

2.1.2 Relevés de terrain

Plusieurs types de variables ont été relevés sur le terrain : des variables attestant de l'état sanitaire des arbres, et des variables caractérisant la station et le peuplement : des variables topographiques, édaphiques, dendrométriques et biotiques. La fiche de relevés de terrain est donnée en annexe 3.

Etat sanitaire des peuplements

Sur chaque placette, vingt Pins sylvestres dominants ou co-dominants sélectionnés autour du point GPS central de la placette sont mesurés. Ils doivent se situer dans l'étage dominant voire co-dominant mais jamais dans l'étage dominé. Le périmètre de prospection dans lequel se situent les arbres est estimé à l'œil. L'évaluation de l'état sanitaire est réalisée selon un protocole inspiré du Département de Santé des Forêt (DSF) : le protocole DEFIFOL, destiné à l'évaluation de l'état sanitaire des résineux. Pour chaque arbre, les paramètres sanitaires relevés sont les suivants : l'estimation visuelle de défoliation du houppier (%) par rapport à un arbre pleinement folié de référence en utilisant des photos standards (Annexe 4), le nombre de nids de chenilles processionnaires (*Thaumetopoea pityocampa*), la proportion de gui (*Viscum album* L.) dans la couronne en pourcentage d'occupation du houppier par rapport au feuillage, la microphyllie en pourcentage de recouvrement du houppier (une branche étant considérée microphyllie lorsque ses aiguilles mesurent moins de la moitié de leur taille supposée normale), et enfin la proportion de décoloration dans les branchages en pourcentage de recouvrement du houppier. Les branches et aiguilles situées en-dessous de la partie vivante du houppier, ainsi que dans la partie interne ombragée de l'arbre ne sont pas pris en compte dans l'estimation des paramètres ci-dessus.

Suite à ces relevés, chacune de ces variables 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 (présentant 100% de défoliation) rapporté au nombre total d'arbres mesurés sur la placette (20).

Critères dendrométriques

La structure du peuplement pouvant influencer la croissance des arbres et leur état sanitaire, les 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 et d'énergie 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), le confinement (absent, faible, fort) dans le paysage par rapport au relief environnant. Les différentes positions possibles dans le versant sont montrées figure 9. Les sommets ou une topographie convexe sont propices aux départs d'eau, contrairement aux situations en bas de versants ou aux stations concaves.

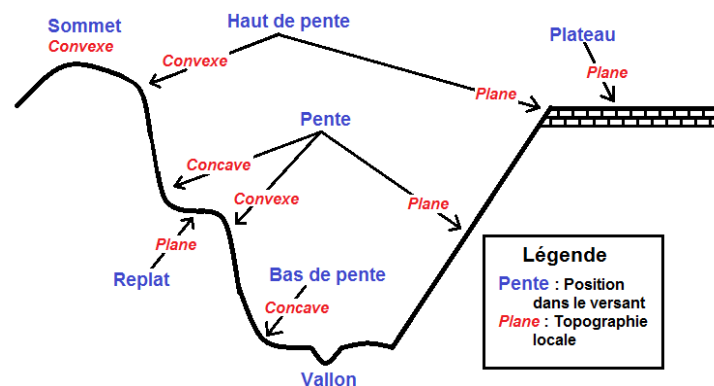


Figure 9: Position topographique et topographie locale (Source : Ripert & Vennetier, 2002)

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 du sol à 20 cm de profondeur a été relevé, ainsi que la texture des horizons, le proportion d'éléments grossiers (%), la profondeur des horizons et la profondeur totale du sol (cm), 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 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), annexe 5.

L'indice topo-édaphique

Une grille de notation (Annexe 5) développée pour l'étude des potentialités forestières en basse Provence par Ripert & Vennetier (2002) a été utilisée pour déterminer un indice topo-édaphique 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, soit : la potentialité forestière. 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).

2.2 Les données climatiques

Le climat est un facteur essentiel du comportement des essences. Il existe de nombreuses sources de données météorologiques disponibles (températures, précipitations, vent, humidité de l'air...) à des échelles spatiales (régionales, locales...) et temporelles (seconde, minutes, mois, années, décennies...). Afin de comprendre le comportement des essences vis-à-vis du climat, le forestier doit effectuer la plupart du temps une analyse rétrospective sur plusieurs années, voire dizaines d'années. De plus, il nous est important de disposer de données climatiques qui caractérisent les niveaux potentiels de sécheresse sur notre secteur d'étude (méditerranéen) car ceux-ci peuvent moduler fortement le choix des essences ou du type de sylviculture à adopter pour le gestionnaire forestier.

2.2.1 Données climatiques disponibles et choix des données

La détermination des données climatiques à utiliser dépend des données recherchées. Le topoclimat désigne 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). Le Pin sylvestre en PACA se distribue surtout dans les régions montagneuses jusqu'à 2100m, or ce sont dans ces zones-ci où les variations de topographie, et donc climatiques, sont les plus importantes. Nous avons donc besoin de données climatiques à une échelle assez fine pour obtenir une plus grande précision lors de la mise en corrélation des données climatiques avec les mesures sanitaires des placettes.

L'utilisation des SIG (Systèmes d'Informations Géographiques) permet le calcul de données climatiques spatialisées, et présente l'avantage de fournir des informations en tout point du territoire. Les données climatiques obtenues se présentent généralement sous la forme d'un maillage régulier, chaque cellule possédant une valeur caractérisant la variable. La résolution des données obtenues dépend du MNT (modèle numérique de terrain). La résolution est la dimension du plus petit détail observable. Le MNT est une représentation de la topographie d'une zone géographique sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique. Le pas le plus fin couvrant la totalité du territoire français est actuellement de 50m (La difficulté est de trouver le meilleur compromis entre les données disponibles, le pas de temps, l'échelle spatiale et la précision des données).

Il existe différentes sources de données climatiques qui diffèrent selon les paramètres disponibles, la résolution, la temporalité, la prise en compte ou non du topoclimat, l'intégration ou non de l'évapotranspiration et la formule utilisée pour l'obtenir (Tableau 4). Parmi les données climatiques existantes, l'étude a recours aux sources AURELHY ©Météo France et DIGITALIS

©AgroParisTech.

Tableau 4: Comparaison des modèles disponibles pour spatialiser les données climatiques (Source : Lemaire et Pigeon, 2015)

Aut eur	Source de données climatiques	Données disponibles	Période	Avantages	Inconvénients
Météo France	AURELHY <i>(Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie)</i> Résolution spatiale = 1 km	<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 	Moyenne trentenaire de 1971-2000 ; 1981-2010	<ul style="list-style-type: none"> - Très grand nombre de stations météorologiques impliquées pour la pluviométrie (3400 stations météorologiques) et la température (1500 stations météorologiques), pour construire la base de données climatiques - 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 - La faible fréquence du pas de temps des données (moyenne trentenaire) - Postes de référence pour construire la base de données 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
AgroParisTech	DIGITALIS Résolution spatiale = 50 m	<ul style="list-style-type: none"> - P mensuelles et annuelles -Tmoy mensuelles et annuelles -Ray atmosphérique mensuelles et annuelles - ETP formule de Turc 	Moyenne trentenaire de 1961-1990	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte du topoclimat : exposition pente (MNT au pas du 50 m) pour l'évapotranspiration potentielle ; - Postes de référence pour construire la base de données climatiques toujours les mêmes d'une normale climatique à l'autre. 	<ul style="list-style-type: none"> - 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.

Les sources AURELHY et DIGITALIS donnent des moyennes trentenaires des paramètres climatiques (respectivement 1980-2010 et 1961-1990). Ils présentent des complémentarités qui nous ont conduit à hybrider les bases de données pour effectuer l'analyse de l'état sanitaire du Pin sylvestre. AURELHY a été choisi, d'une part pour sa faible résolution (1km) et d'autre part 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). Cependant AURLHY 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. Pour une meilleure précision l'ensemble des données climatiques est aussi traité au 50m : des corrections étant appliquées pour obtenir une telle résolution à partir des données au 1km de AURELHY. Le détail du traitement des données pour combiner les modèles et obtenir l'échelle de données voulue est présenté plus bas (Cf §2.3.2).

2.2.2 Choix de la formule d'ETP

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). Une valeur négative signifie qu'il ne pleut pas assez pour répondre à la demande de la plante. Elle est donc soumise à un stress hydrique plus ou moins important.

Parmi les différentes formules d'ETP existantes (Thornthwaite, Turc, Hargreaves, Penman-Monteith), c'est la formule de l'ETP de Turc (1961), donnée par l'équation qui suit, qui a été utilisée dans cette étude :

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

n = période considérée

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

Rg = 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).

2.3 Traitement des données

L'ensemble des variables utilisées pour réaliser les analyses cherchant un lien entre l'état sanitaire des Pins sylvestre et les variables dendrométriques, topoédaphiques et climatiques sont résumée en Annexe 6.

2.3.1 Caractérisation du dépérissement dans l'étude

Les variables indicatrices de dépérissement des Pins sylvestres mesurées sur le terrain sont la décoloration des aiguilles, la microphyllie, le taux de défoliation, (en proportion d'occupation du houppier) et la mortalité. Les variables continues de la mortalité, et le « taux_depe_50 » ont été utilisés comme variables cibles dans l'étude pour représenter le dépérissement des pins. Cette dernière variable correspond au pourcentage d'arbres en classe c3 ou plus du protocole DEFIFOL du DSF (présentant plus de 50% de défoliation). La variable binaire « depe20 » est également utilisée pour certaines analyses : selon le protocole du DSF, cette variable classe un peuplement comme dépérissant si au moins 20 % des arbres dominants ou co-dominants inventoriés sur la placette ont plus de 50 % de perte foliaire (placettes classées 3 ou plus du protocole du DSF).

2.3.2 Traitement SIG et correction d'échelle

Le traitement des données SIG a été réalisé grâce au logiciel Qgis. La résolution des données AURELHY est de 1km, à cette échelle le topoclimat des placettes n'est pas pris en compte. La résolution souhaitée des données serait de 50m, une correction des données nécessaires au calcul de l'ETP de Turc a été effectuée, soit sur : les températures et le rayonnement. Les données sont obtenues sous format raster.

La température a été ajustée selon un facteur de correction unique suivant le principe que celle-ci varie de façon constante de 1°C tous les 154m (source), bien que certaines études aient montré que cette relation n'était pas constante selon la situation géographique (montagne, plaine...). Les altitudes de AURELHY au 1km ont été rastérisées, puis ré-échantillonnées au 50m, en vérifiant que les points de coordonnées soient au milieu des mailles du MNT. Une différence d'altitude est calculée sur SIG entre les cellules du MNT au 50m et les valeurs d'altitude AURELHY au 1km, localisées au centre de chaque maille. Une interpolation par Bspline a alors été appliquée à cette couche des différence d'altitude. La relation altitude-température décrite ci-dessus a alors été appliquée à cette même couche sur l'ensemble de la zone d'étude pour chaque cellule au 50m.

En ce qui concerne le rayonnement, les données de DIGITALIS disponibles au 50m ont été utilisées. Le rayonnement, variant au cours de l'année, présente 12 valeurs différentes pour chaque mois, pour chaque localisation géographique. Douze facteurs de correction sont donc nécessaires. Pour chaque mois, la grille au 50m du rayonnement mensuel a été ré-échantillonnée au 1km par

une moyenne, et ré-échantillonnée au 50m afin d'avoir la même valeur moyenne du kilomètre dans chaque maille 50m. Le facteur de correction a alors été obtenu en faisant le rapport entre la couche du rayonnement mensuel au 50m et la couche du rayonnement mensuel au 1km. Ce facteur correctif, spécifique à chaque maille, est alors appliqué à la valeur du rayonnement au 50m.

Enfin les températures sur une certaine période, bilans hydriques et autres paramètres climatiques souhaités ont pu être calculés grâce à une calculatrice raster. L'exemple du raster d'un paramètre climatique généré est présenté annexe 7. Les données climatiques ont finalement été extraites à l'emplacement géographique des placettes échantillonnées pour être mises en relation avec les données sanitaires des peuplements. Les données de terrain des stations ont été privilégiées, mais le TPI, l'altitude et l'orientation issus des MNT ont été utilisés pour plus de précision. Un exemple de carte du TPI spatialisé, généré au 25m, est présenté Annexe 7.

2.3.3 Analyses statistiques

Analyses multiples pour la détermination du modèle de dépérissement

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide des logiciels R, Statgraphics et Tanagra. L'étude consistant à évaluer les facteurs déterminants du dépérissement du Pin sylvestre en PACA parmi des variables dendrométriques, topographiques, climatiques et biotiques, le traitement des données a eu recours à des analyses multivariées. Les indices de risque de dépérissement du Pin sylvestre et de présence du gui ont été réalisés à l'aide de la méthode de régression PLS (Partial Least Square régression). Cette technique de régression vise à prédire les valeurs prises par une variable cible (à expliquer) à partir d'une série de variables prédictives. C'est une alternative à la régression linéaire multiple, à l'ACP ou encore à l'AFC. 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 régression PLS assure une décorrélation des variables, en maximisant la covariance entre elles et en prenant déjà comme axes les variables significatives, là où l'ACP minimiserait plutôt la variance et projetterait dans un premier temps les variables explicatives puis les variables à expliquer.

La qualité de prédiction des modèles a été réalisée par validation croisée, où la taille de l'échantillon à tester utilisée est généralement 1/3. 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 du modèle. Les variables ont été sélectionnées dans un intervalle de confiance de 95%.

La méthode de classification C.4.5 a été réalisée afin d'affiner les modèles explicatifs issus des PLS : elle discrimine les placettes selon des seuils significatifs détectés dans les variables retenues.

Analyse pour la réalisation des cartes de vigilance du dépérissement

Afin de construire les cartes de vigilance, une régression logistique sur les mêmes variables binaires déterminées pour les classifications C.4.5 a été utilisée. Elle donne des coefficients à injecter dans une équation qui donne une probabilité de présence de risque de dépérissement. Cette probabilité a été spatialisée sous forme de carte au 50m.

3. Résultats

3.1 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) déterminés grâce aux résultats de l'étude de Thabeet (2008), du dépérissement du Pin sylvestre via l'analyse du NDVI et des cernes de croissance (Cf §2.1.1). Il a donc été testé dans un premier temps si notre variable du taux de défoliation moyen, mesuré par observation sur le terrain, répondait de la même manière à ces seuils, grâce des Anovas. La figure 10.A) montre un gradient de défoliation corrélé positivement avec l'IKR, où un taux de défoliation moyen significativement plus élevé est identifié sur les versants chaud par rapport aux versants frais ($P < 0.01$). Un taux de défoliation plus élevé sur les hauts de versants par rapport aux autres positions dans la pente (plat, milieu ou bas de versant) ressort également (Figure 10.C), $P < 0.01$. Cependant aucune différence significative de défoliation n'a été identifiée au seuil de 1200m (Figure 10.B), $F = 1.88$, $P = 0.18$).

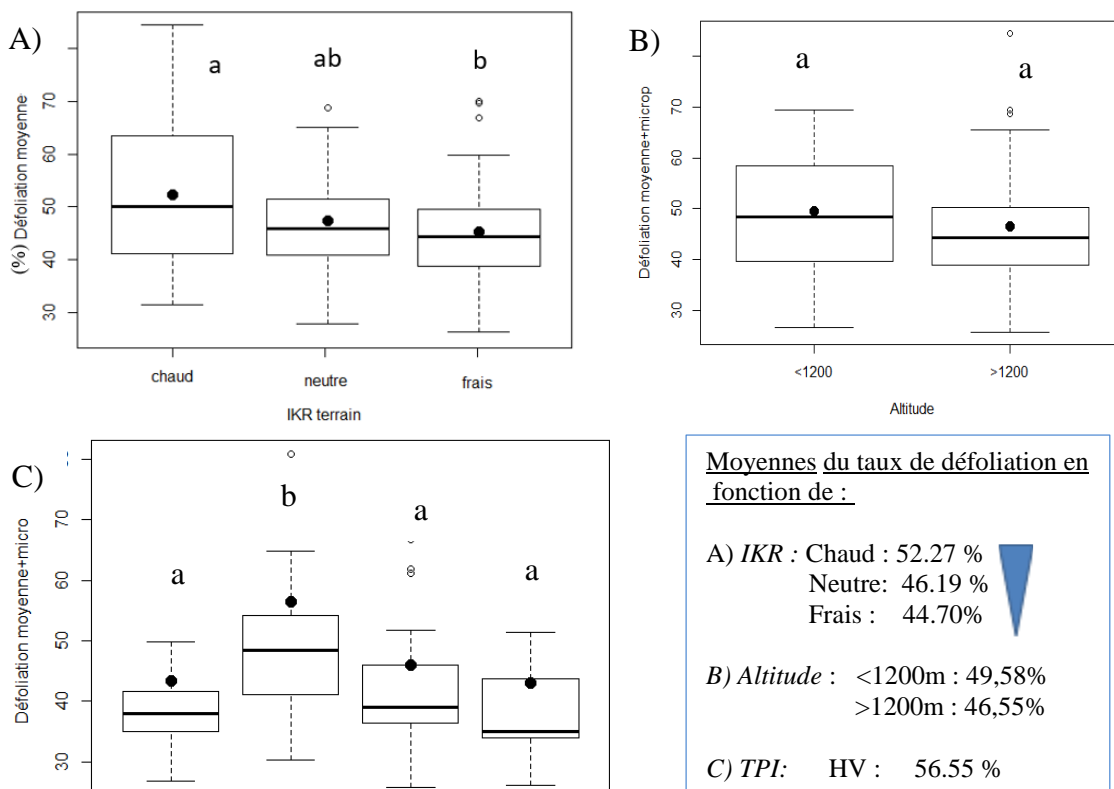


Figure 10: Comparaison des moyennes de défoliation des placettes en fonction des classes A) d'IKR B) d'altitude et C) de TPI, établies dans le plan d'échantillonnage

3.2 Caractérisation de l'état sanitaire des placettes et relations simples de la défoliation et de la mortalité avec différents facteurs

Ce paragraphe caractérise l'état sanitaire des placettes d'étude en PACA et établit des premières relations entre les paramètres sanitaires et certaines variables explicatives.

3.2.1 Caractérisation de l'état sanitaire des placettes

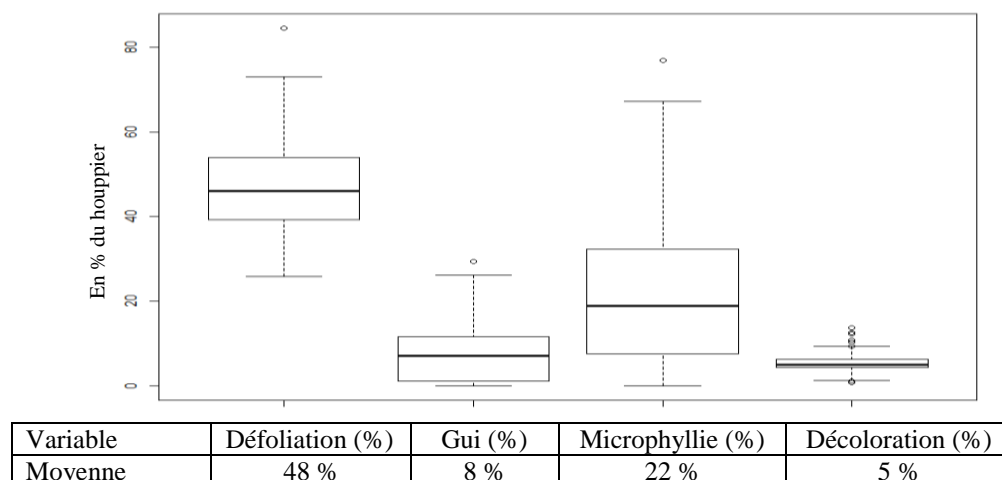


Figure 11: Moyennes des variables attestant du dépérissement des peuplements pour une placette moyenne en PACA (en pourcentage d'occupation du houppier).

Dans une placette moyenne, le taux de défoliation moyen du houppier des arbres s'élève à 48%. (Figure 11). La microphyllie moyenne est logiquement la moitié du taux de défoliation. Le taux de décoloration reste faible. Les arbres présentent en moyenne un taux de gui inférieur à 10% du houppier.

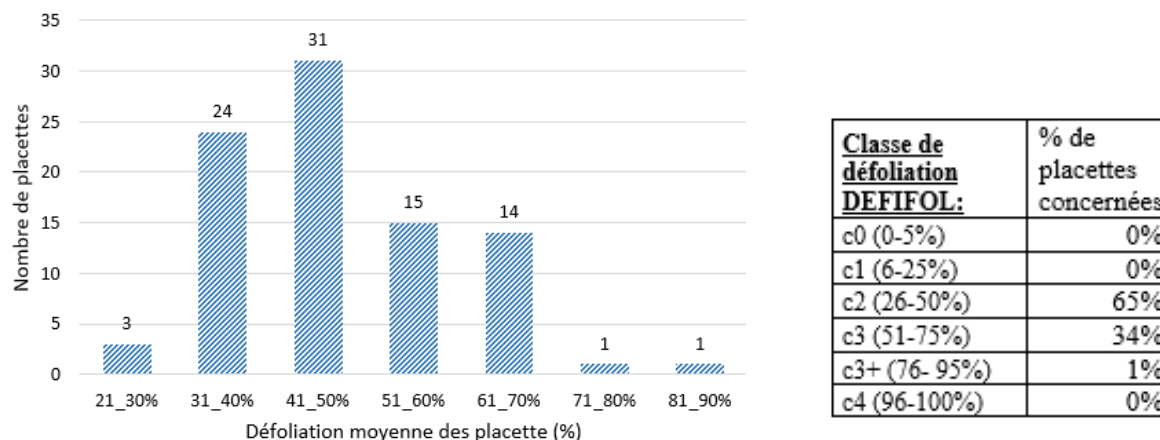


Figure 12: Effectifs des placettes par taux de défoliation moyen de leurs houppiers (en %) (n=89) et correspondance avec la classification DEFIFOL.

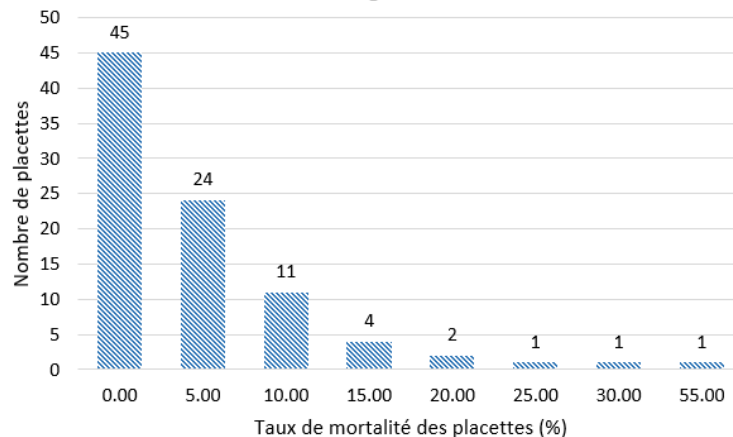


Figure 13: Effectifs des placettes en fonction de leur taux de mortalité (en n=89).

On constate qu'aucune placette ne présente de défoliation moyenne des houppiers de moins de 25%. Un tiers des placettes possèdent entre 41% et 50% de défoliation (Figure 12). En terme de classification du protocole DEFIFOL, deux-tiers des placettes sont catégorisées en classe c2 (26% et 50%). Selon ce même protocole, une placette est considérée comme dépérissante si 20% des arbres présentent plus de 50% de perte foliaire (placettes classées 3 ou plus du protocole du DSF). Parmi les 89 placettes étudiées sur la région PACA, 61% sont considérées comme dépérissantes. La moitié des placettes ont un taux de mortalité inférieur à 5%, mais 22% (n=20) de celles-ci présentent quand même un taux de mortalité supérieur ou égal à 10% (Figure 13). Le taux de mortalité moyen sur les placettes échantillonnées est de 5%.

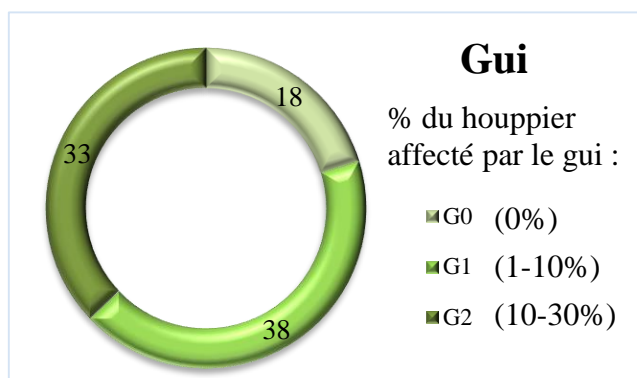


Figure 14: Effectif de placettes en fonction du taux d'infestation des houppiers par le gui

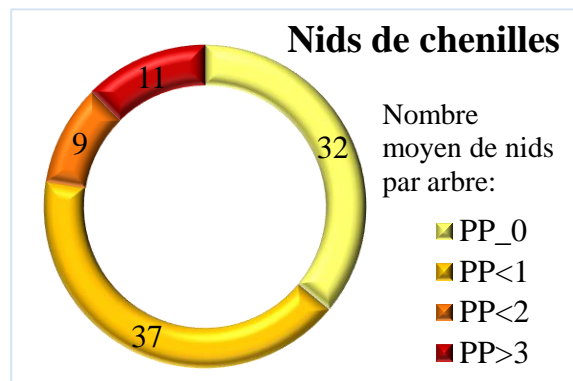


Figure 15: Effectif de placettes en fonction du nombre moyen de nids par arbre

Les placettes sont relativement touchées par le gui, avec 80% d'entre elles présentant un taux supérieur à 10% (n=71) (Figure 14). En ce qui concerne les nids de chenilles processionnaires en revanche, le nombre de nids moyen par placette est de 11,8, soit moins d'un nid par arbre : $\frac{3}{4}$ des placettes sont dans ce cas (n=77), dont presque la moitié avec aucun nid de chenilles (Figure 15). Mais certaines placettes peuvent atteindre jusqu'à 120 nids, soit 6 nids par arbre en moyenne.

3.2.2 Relations simples de la défoliation et de la mortalité avec différents facteurs

Des différences significatives de défoliation moyenne des houppiers selon le TPI et l'IKR ont été détectées plus haut (Cf §3.1). D'autres analyses simples réalisées à partir d'ANOVA à un facteur ont permis d'identifier des relations entre l'état sanitaire et d'autres variables explicatives.

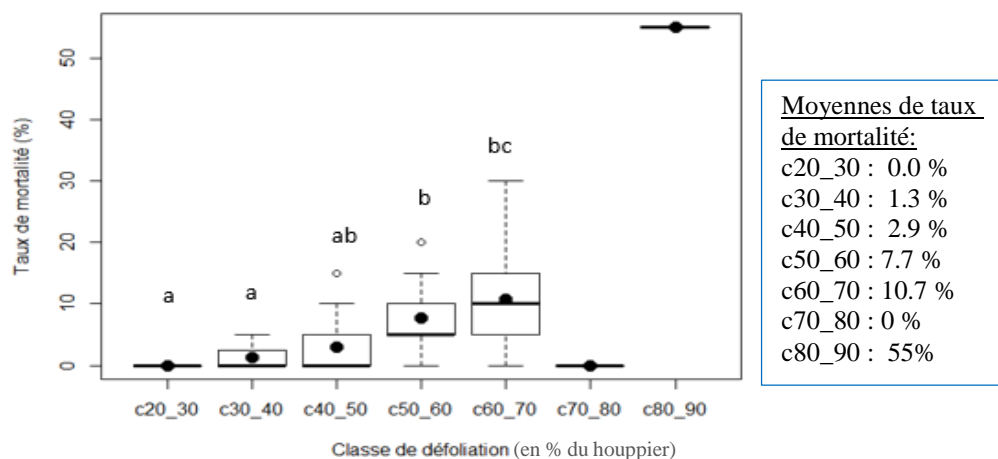


Figure 16: Comparaison des taux de mortalité en fonction du taux de défoliation des placettes

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 (Figure 16, $P < 0.01$), 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%.

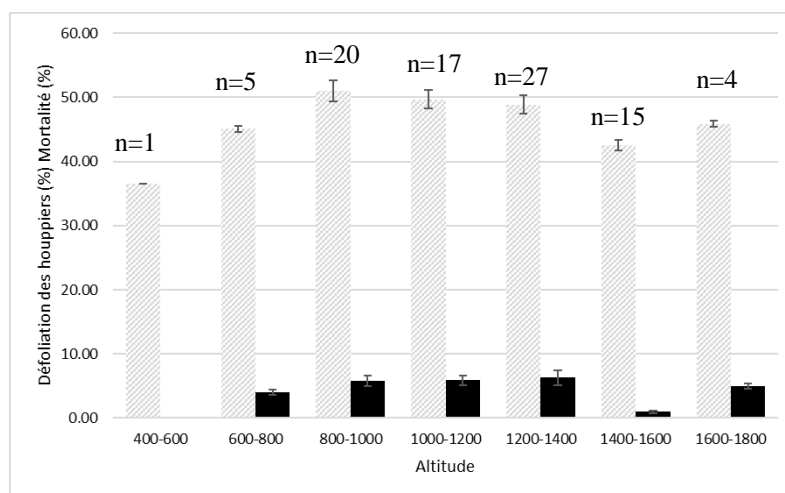


Figure 17: Comparaison des taux de défoliation en fonction des classes d'altitudes

Hormis une placette à 415m d'altitude, le taux de défoliation est toujours supérieur à 40 % mais semblerait diminuer au-delà de 1400m (Figure 17). Cependant aucune différence signifi

tive n'a été détectée (one-way ANOVA, $F=1.109$, $P=0.364$). Aucune tendance sur la mortalité ne peut être mise en évidence (Kruskal-wallis, $P=0.20$).

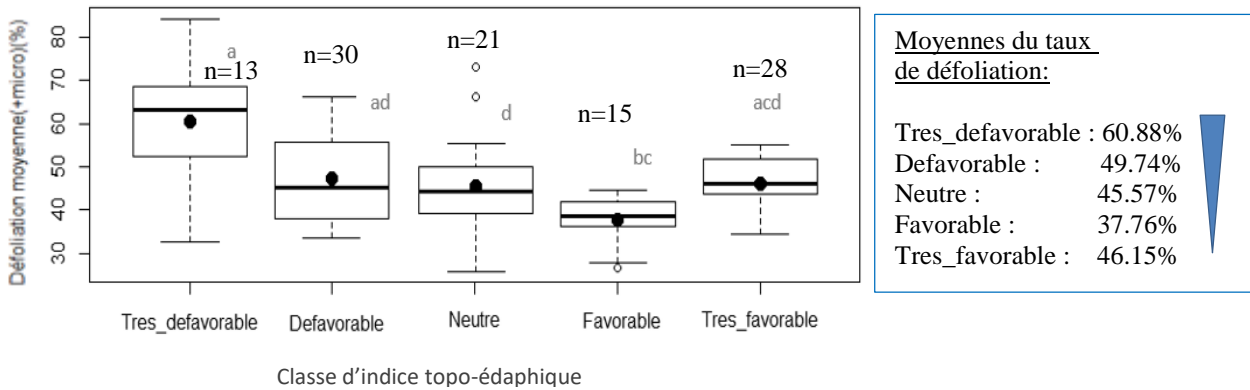


Figure 18: Comparaison du taux de défoliation des placettes selon leur indice topo-édaphique

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 (Figure 18). Une placette ayant un indice très défavorable (<-15) montre un de taux de défoliation moyen 61%.

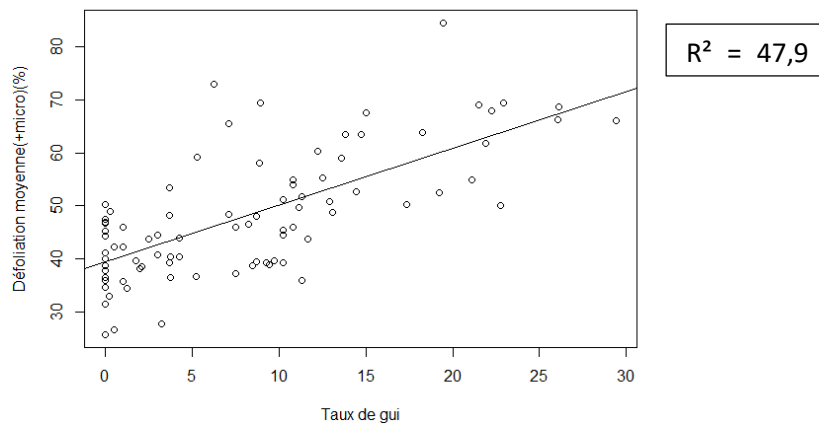


Figure 19: Relation linéaire simple entre le taux de présence de gui (%) et le taux de défoliation moyen

Une corrélation positive entre le taux d'infestation du gui et le taux de défoliation des houppiers a été mise en évidence (Figure 19, $r = 0.47$, $P < 0.01$) 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 avec le nombre de nids, bien que les chenilles soient pourtant des insectes défoliateurs qui se nourrissent des aiguilles des pins. Aucune relation linéaire simple particulière n'a pu être mise en évidence entre des variables du dépérissement et des variables climatiques.

3.3 Détermination d'un modèle explicatif multifactoriel du dépérissement

Les relations simples peuvent donner un premier aperçu des liens qui peuvent exister entre certaines variables explicatives et les variables liées au dépérissement, mais le dépérissement ne pouvant être, par définition, pas attribué à un seul agent causal, des régressions multiples (PLS) ont donc surtout été utilisées pour déterminer les facteurs prépondérants dans le dépérissement des Pins sylvestres.

3.3.1 Comparaison des modèles « défoliation » et « taux de mortalité »

Plusieurs variables cibles attestant du dépérissement des peuplements ont été testées par régression PLS pour déterminer un modèle explicatif. Les deux variables principales sont présentées figure 20 : la variable « taux_depe50 » (pourcentage d'arbres présentant plus de 50% de défoliation) et la variable « taux de mortalité ».

Modèle depe_50

1

Modèle taux de mortalité

2

A) Coefficients non-standardisés : poids relatifs des variables explicatives significatives influençant la variable cible

	Coefficients standardisés "Taux_depe50"
Gui_moy	0.558661
PP_moy	0.329652
G_Totale	-0.267907
Indice_topo_edaphique	-0.226022

1

	Coefficients standardisés "Taux_mortalite"
Gui_moy	0.592151
PP_moy	0.364741
Indice_topoedaphique	-0.223772
G_Totale	-0.209986
Confinement	-0.119769

2

La signification des variables est rappelée en annexe 6.

B) Pourcentage de variance expliqué par les variables explicatives significatives et qualité de prédiction du modèle

	% cumulé	Prévision moyenne
Composante de Y	de Y	R-carré
1	70.2012	76.2736
2	71.7292	75.1257
3	71.744	75.1744
4	71.744	75.1847

1

	% cumulé	Prévision moyenne
Composante de Y	de Y	R-carré
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

2

Composante : nombre de composantes (axes) identifié par la modèle

% cumulé de Y : % de variances expliqué par les variables significatives identifiées

R² : qualité de prédiction du modèle (%)

C) Graphiques des valeurs observée et prévues pour la variable cible

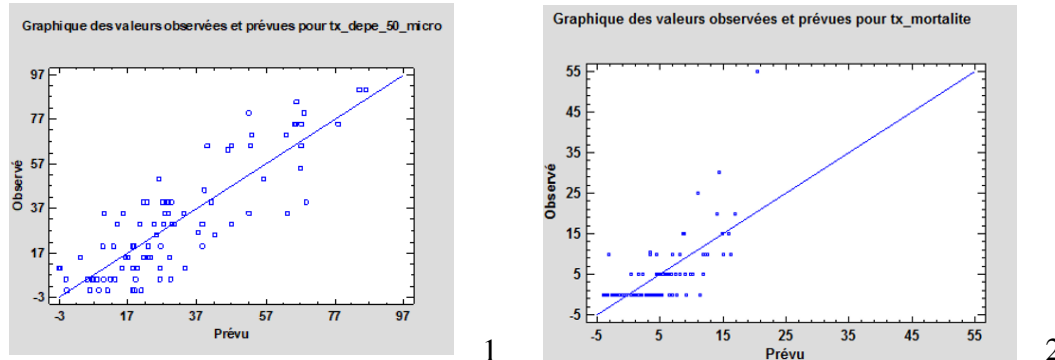


Figure 20: Comparaison des modèles explicatifs du dépérissement avec les variables "défoliation" ou "taux de mortalité" utilisées comme variables cibles par régression PLS.

Le taux de `depe_50` et la mortalité sont deux variables utilisées pour traduire le dépérissement du Pin sylvestre. La mortalité apparaît comme une variable essentielle à étudier dans les phénomènes de dépérissements. Les deux modèles obtenus sont relativement bons : le modèle basé sur la mortalité présente 45% de variance expliquée (« % cumulé ») et 40% de qualité de prédiction (« R² ») (Figure 20, A,2)), contre 71,7% de variance expliquée pour le modèle de défoliation basé sur le « `taux_depe50` » et 75,2% de qualité de prédiction du modèle (Figure 20, A,1). Le modèle défoliation étant le meilleur, « `taux_depe50` » restera donc la variable cible sélectionnée pour analyser le dépérissement des peuplements de Pins sylvestres.

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

3.3.2 Les variables significatives retenues dans le modèle « défoliation »

Les résultats de la régression PLS du modèle « `taux_depe50` » (Figure 20, A, 1) présentent donc les variables ayant une influence significative sur un fort taux de défoliation des houppiers dans un intervalle de confiance de 95%. Les deux variables largement prépondérantes responsables d'une forte défoliation du Pin sylvestre, et donc de dépérissement, sont des variables biotiques : le Gui (`Gui_moy`) et les Chenilles processionnaires (`PP_moy`) avec des poids relatifs de 56% et 33% ($P < 0.01$). Elles sont corrélées positivement au dépérissement. Vient ensuite l'indice topo-édaphique qui pèse à 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 (`G_tot`) et le confinement sont également significativement influent et négativement corrélés au

dépérissement. Donc moins la densité d'arbres est élevée, plus il y a de dépérissement, ce qui est contre-intuitif. On constate qu'aucune variable climatique ne ressort en premier plan cependant.

Avec les coefficients non standardisés du modèle, on obtient les coefficients à injecter dans l'équation de l'indice « défoliation ». Cette équation permet de prédire le pourcentage d'arbres présentant plus de 50% de défoliation sur une placette, et donc de prédire si une placette sera dépérissante ou non.

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

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.

3.3.1 Le modèle « gui »

La figure 21 présente le modèle généré, explicatif de la présence du gui sur les placettes échantillonnées. La variable cible ici est donc le taux de gui moyen par placette.

	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

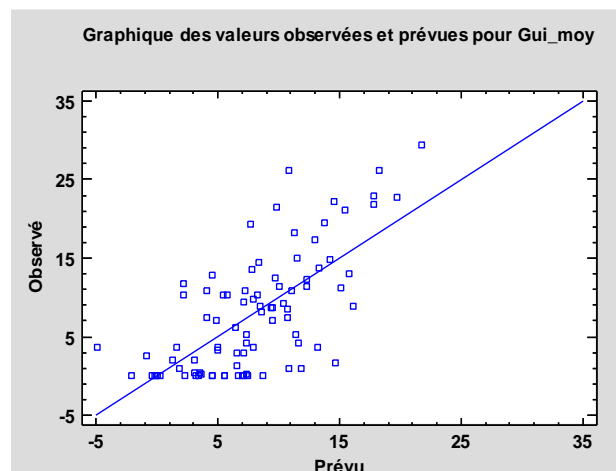


Figure 21: Résultats de la PLS appliquée à la variable cible "Gui_moy"

Le modèle obtenu est assez bon : il permet d'expliquer 50% de la variance du pourcentage de gui moyen sur une placette, et la qualité de prédiction est acceptable avec une capacité de 47%. On constate que la présence de gui semble déterminée essentiellement par des variables climatiques, notamment liées aux conditions hydriques climatiques et édaphiques. Toutes les variables retenues sont corrélées négativement à la présence de gui. La présence de gui est corrélée avec une situation hydrique édaphique défavorable de la placette (Bilan_H2O_position), 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, un endroit confiné étant un endroit plus propice à être à l'ombre, donc plus frais et humide, en bas de versant souvent. La présence de gui sur nos placettes est donc favorisée par un microclimat chaud et sec. Cependant de faibles températures de décembre sont corrélées avec une forte présence de gui. Ce dernier résultat va à l'encontre de cette dernière conclusion. L'indice prédictif du pourcentage de gui sur une station est donné ci-dessous :

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

3.3.2 Classification des variables explicatives du dépérissement

Pour plus de précision, la classification par test C.4.5 permet d'affiner les modèles explicatifs issus des PLS, en indiquant des seuils pour les variables explicatives significatives retenues. Le modèle de défoliation a été réalisé à partir de la variable binaire « depe20 », qui détermine lorsqu'une placette possède plus ou moins de 20% de ses arbres qui présentent une défoliation supérieure à 50%, dans ce cas, une placette est considérée comme dépérissante.

Le modèle défoliation (depe20)

Classifier performances

Error rate			0.1124			
Values prediction			Confusion matrix			
Value	Recall	1-Precision		sain20	depe20	Sum
sain20	0.8571	0.1429	sain20	30	5	35
depe20	0.9074	0.0926	depe20	5	49	54
			Sum	35	54	89

Details

Repetition	Test err.	Bootstrap	Bootstrap+
1	0.3123	0.2387	0.2706

Decision tree

- Gui_moy < 10.0000
 - PP_moy < 1.9194
 - Indice_topoedaphique < -2.3500
 - Indice_topoedaphique < -5.7750
 - Indice_topoedaphique < -10.1250 then depe20 = depe20 (70.00 % of 10 examples)
 - Indice_topoedaphique >= -10.1250 then depe20 = sain20 (83.33 % of 6 examples)
 - Indice_topoedaphique >= -5.7750 then depe20 = depe20 (100.00 % of 5 examples)
 - Indice_topoedaphique >= -2.3500 then depe20 = sain20 (86.21 % of 29 examples)
 - PP_moy >= 1.9194 then depe20 = depe20 (100.00 % of 6 examples)
- Gui_moy >= 10.0000 then depe20 = depe20 (93.94 % of 33 examples)

Figure 22: Classification des variables explicatives de la variable depe20 par la méthode C.4.5

Dans l'analyse C.4.5 de la défoliation, le confinement et la surface terrière n'ont pas été retenus par le test. Avec un taux d'erreur sur bootstrap de 27%, le modèle explicatif est bon. La matrice de confusion indique une bonne capacité du modèle à détecter les placettes lorsqu'elles sont saines comme lorsqu'elles sont dépérissantes (« *Classifier performance* », Figure 22) : seules 5 placettes saines sur 35 sont mal classées et seules 5 placettes sur 54 dépérissantes sont mal classées.

Dans 93% des cas, une placette est classée dépérissante si elle présente un taux de gui supérieur à 10% (« *Decision tree* », Figure 22). On considère donc que 10% correspond à un fort taux d'infestation par le gui pour le Pin sylvestre. Lorsque la présence de gui est faible, une placette est classée dépérissante quand elle présente un nombre de nids moyen par arbre supérieur à 1,9 nids. En absence de gui et de nids, une placette est classée dépérissante dans 70% des cas si son indice topo-édaphique est inférieur à 10,1. Un indice de 10,1 appartient à la classe «défavorable » [-15 ; -5] des scores de l'indice topo-édaphique.

Le modèle gui

Le test C.4.5 du modèle de défoliation a indiqué un seuil du taux de gui à 10%, à partir duquel une placette est considérée comme dépérissante. La variable binaire « GUICLASSE » définissant le statut de la placette, selon si elle possède un taux de gui moyen supérieur ou inférieur à 10%, a donc été créée pour appliquer un test C.4.

Error rate			0.1910			
Values prediction			Confusion matrix			
Value	Recall	1-Precision		GUifaible	GUIsup10	Sum
GUifaible	0.7879	0.2778	GUifaible	26	7	33
GUIsup10	0.8214	0.1321	GUIsup10	10	46	56
			Sum	36	53	89

Details

Repetition	Test err.	Bootstrap	Bootstrap+
1	0.3488	0.2908	0.3164

Decision tree

- Alti < 1480.0000
 - Bilan_H2O_position < -0.5000 then GUICLASSE = GUIsup10 (95.65 % of 23 examples)
 - Bilan_H2O_position >= -0.5000
 - P_ETP0410 < -31.4110 then GUICLASSE = GUIsup10 (80.00 % of 30 examples)
 - P_ETP0410 >= -31.4110 then GUICLASSE = GUifaible (68.00 % of 25 examples)
- Alti >= 1480.0000 then GUICLASSE = GUifaible (81.82 % of 11 examples)

Figure 23: Classification des variables explicatives de la variable GUI_CLASSE par la méthode C.4.5

La capacité de détection des placettes est assez bonne, en classant bien le GUifaible à 78% et le GUIsup10 à 82% (« *Classifier performance* », Figure 23). Le test n'a pas classé les variables explicatives dans le même ordre que la PLS et la température de décembre et le confinement n'ont pas été retenus. Mais l'altitude reste un facteur majeur influençant la présence du gui : au-dessous

de 1480 m d'altitude, : il est sûr à 82% de trouver un taux de gui supérieur à 10%, et en conséquence, de trouver avec 93% de chance une placette dépérissante d'après les résultats de la C.4.5 sur la défoliation. Ce seuil rejoint le seuil d'altitude détecté précédemment (Cf §3.1, Figure 15). En-dessous de cette altitude, le taux de gui est élevé dans 96% des cas en haut de versant (bilan_H20_position négatif). Enfin, lorsque l'on se situe au-dessous de 1480m d'altitude ainsi qu'en milieu ou bas de versant, c'est le bilan hydrique climatique sur la saison de végétation (P-ETP0410) qui est limitant, avec 80% des placettes fortement güté sous le seuil -31,4mm.

3.1 Cartographie du modèle retenu

Les variables explicatives retenues du dépérissement des peuplements de Pin sylvestre n'étant ni climatiques, ni topographiques, on ne peut donc pas proposer de modèle spatialisé du risque de dépérissement. En revanche, la présence du gui s'explique par plusieurs paramètres climatiques et topographiques, or un taux de gui supérieur à 10% implique un dépérissement des peuplements avec 93% de chance. On a donc proposé une carte basée sur le risque de présence du gui et déterminée à l'aide d'une régression logistique (Figure 24).

Classifier performances

Error rate			0.2809			
Values prediction			Confusion matrix			
Value	Recall	1-Precision		GUIfaible	GUIsup10	Sum
GUIfaible	0.4242	0.3000	GUIfaible	14	19	33
GUIsup10	0.8929	0.2754	GUIsup10	6	50	56
			Sum	20	69	89

Details

Repetition	Test err.	Bootstrap	Bootstrap+
1	0.3695	0.3369	0.3527

Attributes in the equation

Attribute	Coef.	Std-dev	Wald	Signif
constant	-0.252717	0.2463	1.0525	0.3049
P_ETP0410	0.007553	0.0026	8.5516	0.0035

Figure 24: Résultats de la régression logistique appliquée à la variable GUI_CLASSE

Ce modèle détecte bien les GUIsup10 (à 90%), mais moins bien le GUIfaible (seulement 42% de capacité de détection). Le taux d'erreur sur bootstrap est de 28%, soit une qualité de prédiction de 72%. Le coefficient obtenu (de la seule variable explicative retenue par le modèle logistique) est appliqué à la couche raster P-ETP0410 au 50m pour donner une couche de valeurs appelées « logit ». Enfin l'application de la formule suivante :
$$\text{Probit} = \frac{1}{1 + \exp(\text{logit})} * 100$$
, aux mailles de la dernière grille obtenue nous donne alors une probabilité de présence d'un taux de gui moyen supérieur à 10% sur la région PACA (Figure 25, Figure 26).

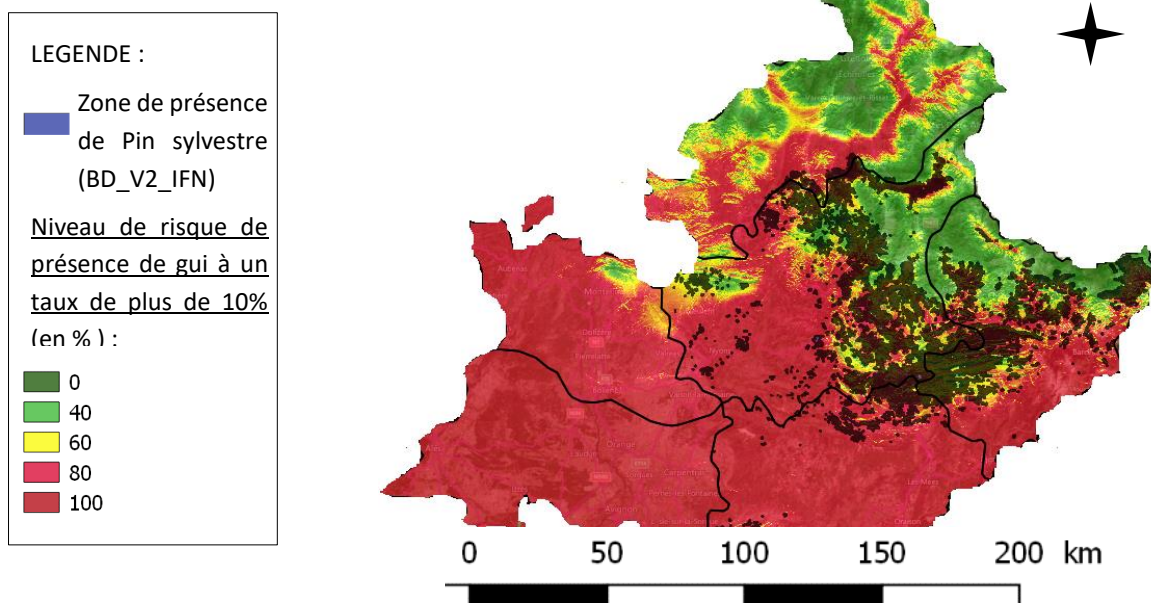


Figure 25: Carte de probabilité de présence de gui à un taux supérieur à 10% en fonction du PETP0410 (Bilan hydrique climatique d'Avril à Octobre sur la moyenne trentenaire 1981-2010)

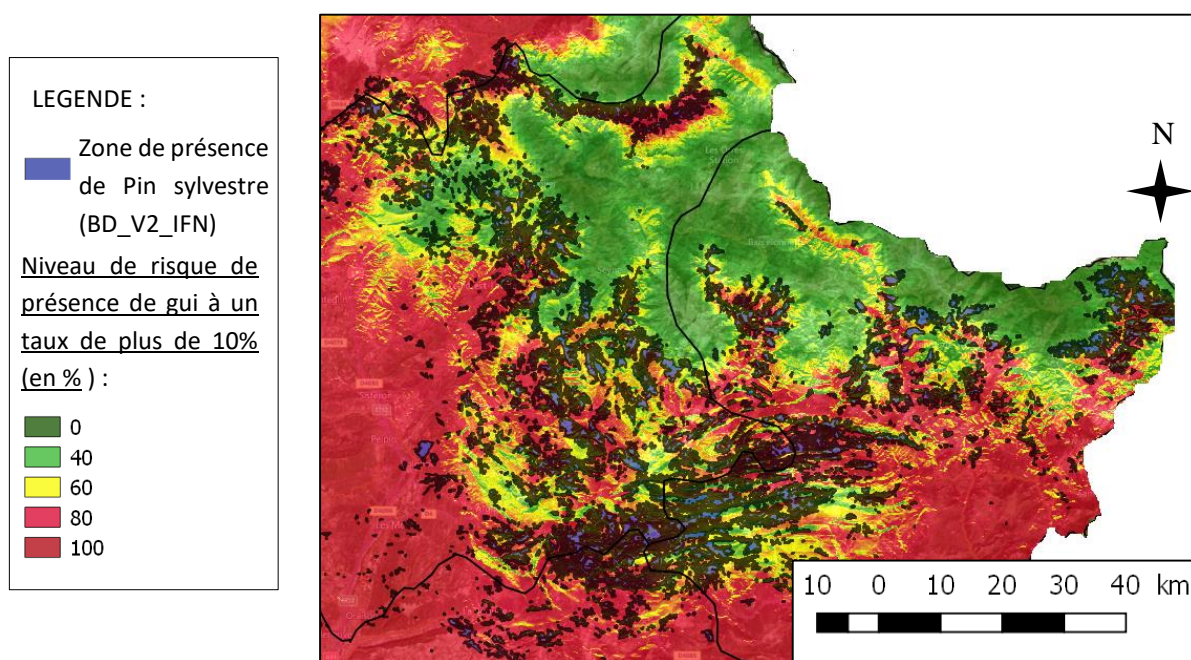


Figure 26: Zoom sur la carte de probabilité de présence de gui à un taux supérieur à 10% en fonction du PETP0410 (Bilan hydrique climatique d'Avril à Octobre sur la moyenne trentenaire 1981-2010)

On peut voir que les zones de très fort risque (>80%) de présence de gui au seuil étudié, est largement répandu en PACA (Figure 25), jusqu'aux portes des Alpes de Sud, où l'on rencontre la zone de présence du Pin sylvestre. L'espèce se localise dans des zones à risque de probabilité de présence de gui supérieur à 40%, souvent supérieur à 60%, dépassant parfois les 80%, autant de zone à risque de dépérissement, en conséquent. Cette carte peut être consultée par les forestiers pour les aider à estimer les risques de dépérissement avec une observation terrain de la forêt dans laquelle ils se trouvent, mais en gardant en tête que le modèle ne détectait pas très bien le GUIfaible.

4. Discussion

Les placettes étudiées présentent en moyenne un taux de défoliation élevé (48%), ainsi qu'un fort taux d'infestation par le gui. Cette étude met en évidence une corrélation positive entre le taux de défoliation et le taux de mortalité, et entre le taux de défoliation et le taux de gui dans les houppiers. Une défoliation significativement plus élevée est trouvée sur les hauts de versant et sur les versants chauds (exposé sud avec une forte pente) et semble diminuer au-delà de 1400m d'altitude. Le modèle multifactoriel du dépérissement établit à partir d'une mesure de défoliation des houppiers fait ressortir les variables gui, nids de chenilles, indice topo-édaphique de la station et surface terrière comme étant les plus influentes. Des seuils des variables explicatives retenues ont pu être détectés : au-delà de 10% de présence de gui ou de 1,8 nids de chenille moyen par arbre, ou au-dessous de 10,1 d'indice topo-édaphique, une placette a de forte chance d'être dépérissante. Ainsi, des variables biotiques comme abiotiques semblent induire du dépérissement chez le Pin sylvestre.

Les paramètres climatiques n'ont pas été retenus dans notre modèle de défoliation, ce qui ne veut pas dire que le climat n'impact pas directement le Pin sylvestre. Le modèle, alternatif, de la présence de gui à un seuil mesuré comme risqué pour le Pin sylvestre (taux>10%) a été établi. En effet, le taux d'infestation du gui est responsable du plus grand risque de dépérissement encouru par les peuplements de l'étude. Cet autre modèle a souligné l'importance des critères liés aux conditions hydriques de la station dans la présence du gui : une altitude inférieure à 1480m, une position en haut de versant et un bilan hydrique climatique d'Avril à Octobre inférieur à 31mm sont propices à un taux de présence gui risqué pour le pin.

A partir des variables retenues, des indices permettant de prédire le taux de défoliation et le taux de gui, ainsi qu'une carte de vigilance ont été créés. Sur l'ensemble de l'aire de présence du pin dans la région, la carte révèle un risque supérieur à 40% d'être touché par le gui à un seuil risqué pour l'essence. Ces outils peuvent servir d'aide à la décision pour le gestionnaire pour déterminer si une station en PACA est favorable au Pin sylvestre ou non.

4.1.1 Importance de la défoliation mesurée en PACA

Le pourcentage moyen de perte foliaire trouvé sur l'ensemble des placettes d'échantillonnage en PACA (48%) dépasse encore les constats de défoliation faits sur les Pins sylvestres, mesurés en 2010 sur les placettes du réseau systématique de surveillance du DSF en région méditerranéenne (32%) (DSF, 2011), ainsi que sur les placettes des Alpes-Maritimes où la défoliation s'élève jusqu'à 44,8% en 2014 (ONF, 2016). Ces résultats confirment la tendance à la hausse des pertes foliaires sur ces pins dans la région PACA. En 2009, le taux de défoliation moyen des placettes des Alpes-Maritimes n'était que de 28,5%.

Une corrélation positive entre la défoliation et la mortalité a été mise en évidence dans notre étude. Galiano *et al.* (2010) a démontré une relation similaire mais avec un coefficient de corrélation plus élevé ($R^2 = 0.62$). Cependant cette dernière étude a eu lieu sur une zone ayant été spécifiquement affectée par la sécheresse (ayant eu lieu deux ans auparavant et s'étant prolongé) et présentant des dommages avérés sur les Pins sylvestres.

4.1.2 La part des variables climatiques dans la défoliation

L'influence du climat sur le dépérissement du Pin sylvestre au travers de l'observation de la défoliation n'a pas été mise en évidence, ni par relation simple, ni par analyse multiple, en dépit des situations d'excès de températures et de déficit hydrique dans la région depuis l'année 2003 notamment. Plusieurs études ont pourtant montré l'effet de la sécheresse sur le Pin sylvestre. Plusieurs cas de dépérissements se traduisant par une diminution de la croissance radiale des cernes annuelles sous l'effet de la sécheresse ont été décrits pour le Pin Sylvestre au niveau de la péninsule ibérique (Herrero *et al.*, 2013; Marqués *et al.*, 2016; Martínez-Vilalta & Piñol, 2002), de l'arrière-pays méditerranéen (Thabeet, 2008), jusque dans les Alpes et le Valais Suisse (Bigler *et al.*, 2006). Les études de cernes mettant en relation l'accroissement annuel moyen de l'arbre avec les années climatiques sont plus propices à mettre en évidence l'impact du climat. Dans des situations critiques vis-à-vis du facteur hydrique, qu'il soit d'origine climatique ou édaphique, le Pin sylvestre répond même par un blocage estival presque total (Keller *et al.*, 2000). L'absence de détection de la part des variables climatiques dans notre modèle peut venir du fait qu'en l'absence de gui, le Pin sylvestre reste malgré tout une espèce résistante à la sécheresse (Masson, 2005 ; Bréda *et al.*, 2006 ; Forêt Wallone, 2015). Une autre explication peut venir des données climatiques et de l'utilisation de moyennes trentenaires qui masque les épisodes de sécheresse marquée des années 2000. En effet, Thauvin (2008) met en évidence la part du bilan hydrique climatique dans la mortalité du Pin sylvestre dans les Alpes- Maritimes, mais souligne que c'est l'évolution relative et non pas le bilan hydrique estival moyen - qui représente des conditions stationnelles plus ou moins favorable - est responsable de la mortalité des branches. La période 2003-2007 avait été spécifiquement plus discriminante.

4.1.3 Les variables prépondérantes dans le modèle de défoliation

Notre modèle de défoliation établi par PLS a conservé quatre variables explicatives significatives, parmi lesquelles le gui possède la plus grande part. Deux de ces variables, à savoir, l'occurrence de gui et la densité de la placette, se retrouve en commun avec des variables significatives identifiées par Galiano *et al.* (2010), une étude ayant étudié le caractère multifactoriel du dépérissement et de la mortalité des Pins sylvestres. Les deux facteurs les plus importants identifiés par leur étude sont un indice de sécheresse climatique basé sur le bilan hydrique climatique des mois d'été, ainsi que la densité de la placette (Galiano *et al.*, 2010). Ils retrouvent donc un facteur climatique de sécheresse en cause majeur du dépérissement, contrairement à nous. Cette différence peut s'expliquer par le fait qu'ils aient ciblé une zone d'étude spécifiquement touchée par la sécheresse et par le fait que le nombre de facteurs explicatifs testé est nettement moindre au notre. Si la densité (via la surface terrière) a aussi été retenue dans notre modèle, la corrélation est négative tandis qu'elle est positive chez Galiano *et al.* (2010). Dans leur cas, la compétition intraspécifique pour la lumière et les ressources peuvent être responsables de cette relation, dans notre cas, la corrélation est plus difficile à expliquer. Elle pourrait s'expliquer par le fait que le gui est un facteur prépondérant dans la défoliation de nos placettes, or si le couvert est moins dense, le gui – qui affectionne les conditions chaudes et sèches - a plus de place et de lumière pour se développer, d'où une plus grande défoliation des pins sur les placettes les moins dense, à terme. Cette explication suggérerait le caractère prédisposant du parasite dans le dépérissement de l'essence, ce qui rejoint les hypothèses de Galiano *et al.*, (2010).

Le modèle de Galiano *et al.* (2010) établi par GLM (Generalized linear model), n'a ôté aucune variable testée à l'échelle de la placette, elles étaient toutes significativement corrélées à la défoliation et à la mortalité. Cependant, beaucoup moins de variables que dans notre étude ont été testées (six variables seulement). Ils reconnaissent cependant que de nombreuses autres causes contribuant au dépérissement peuvent être impliquées, au-regard de la littérature (Franklin *et al.*, 2013; Manion, 1981).

4.1.4 Le gui

La défoliation augmente sur les placettes les plus infestées par le gui (*Viscum album ssp. austriacum*). Cette corrélation est conforme avec de précédentes études (Dobbertin et Rigling, 2006 ; Galiano *et al.*, 2010). Notre étude montre aussi dans une moindre mesure, une relation positive entre le gui et la mortalité. Dobbertin *et al.*, (2005) confirme la contribution du gui à la mort prématurée des Pins sylvestres dans le Valais Suisse. Le gui est la première cause de défoliation de notre modèle. Le modèle gui établi, alternatif au modèle défoliation, met en avant des variables climatiques, liées notamment aux conditions hydriques : l'altitude, le bilan en eau de la station et les précipitations d'Avril à Octobre, chacune étant négativement corrélées au taux de présence du gui. Ceci est en accord avec la biologie de l'espèce, qui affectionne les climats chauds et secs. Dans les stations trop chaudes, le Pin sylvestre est parasité par le gui (Masson, 2005) et les

infestations de gui sont plus conséquentes lors des années de stress hydrique (Hartmann 1990). Durant les épisodes de sécheresse, les arbres réduisent leur taux d'évapotranspiration par une fermeture des stomates (Bréda *et al.*, 2006). Mais le gui, qui puise dans les ressources de l'arbre, continue de transpirer, et augmente le stress hydrique de l'arbre (Graham *et al.*, 2000)

Un taux de gui supérieur à 10% a été mis en évidence, ici, comme un seuil risqué pour le dépérissement du Pin sylvestre. Dans le même sens, Dobbertin *et al.* (2005) montre que les arbres infestés à plus de 10% par le gui étant deux à quatre fois plus susceptibles de mourir. Notre étude montre qu'au-delà de 1480m d'altitude on retrouve un taux d'infestation du gui inférieur au seuil considéré comme risqué pour le Pin sylvestre. Or la défoliation diminue elle aussi partir de 1400m, ce qui est cohérent avec le seuil de gui de notre étude et avec celui de Dobbertin *et al.* (2005), pour qui la limite la plus haute à laquelle le gui est retrouvé est de 1490m. Ce dernier souligne que la limite altitudinale supérieure actuelle d'apparition du gui, qui était de 1250m en 2005, se trouve avoir progressé de 200m depuis 100 ans.

4.1.5 Les chenilles processionnaires

Le second facteur de l'étude prépondérant dans la défoliation est le nombre de nids de chenilles processionnaires (*Thaumetopoea pityocampa*) avec lequel il existe une corrélation positive. Cette constatation paraît logique du fait du caractère défoliateur de l'insecte. L'année 2015/2016 s'était révélée particulièrement marquante du fait de deux années consécutives aux hivers trop doux. Ce fut le volume de populations de chenilles le plus haut enregistré depuis 10 ans, le nombre de nids allant jusqu'à 30 nids par arbres. L'impact de la défoliation par les chenilles dans le dépérissement de l'essence est confirmé par différentes études : l'arrivée de la chenille génère une réduction de la croissance, ainsi que des capacités de reproduction du Pin sylvestre, ce qui met en péril la régénération de ces peuplements (Kanat *et al.*, 2005). Une perte d'accroissement annuel moyen des Pins sylvestre de 21% sur 4 ans suivant une infestation a été mesurée en Turquie (Kanat *et al.*, 2005), une perte de l'accroissement radial moyen de 35% a été mesurée sur le Mont-Ventoux (Vaucluse) (Laurent-Hervouet, 1986). (Lemoine, 1977) montre une période de récupération de 3 ans des pins à recouvrir leur croissance normale suite à l'infestation des pins par la chenille dans les landes de Gascogne. La défoliation induite par les nids de chenilles représente donc bien un facteur de risque de dépérissement pour le Pin sylvestre. De plus, le climat détermine fortement la dynamique des agents pathogènes et des ravageurs. Avec le réchauffement, un déplacement moyen de 2,7 à 5km/an vers le Nord de la chenille processionnaire a été reporté (Vennetier, 2012), progressant donc dans l'aire de répartition de Pin sylvestre.

4.1.6 La topographie

Les hauts de versants se sont avérés positivement corrélés avec la défoliation, et le confinement négativement corrélé avec la présence de gui (un confinement élevé correspond aux bas de pentes et fonds de vallée). Ceci est en accord avec les résultats de Thabeet (2008), qui montre que les bas

de versants et les zones concaves sembleraient plus favorables au bon état de santé des Pins sylvestres. Ces conditions correspondent à des situations de bilan hydrique climatique édaphique positif et de faible présence de gui, et donc à des situations favorables à la croissance du pin. L'indice topoédaphique de notre étude, qui caractérise la fertilité d'une station par son caractère favorable ou non vis-à-vis des conditions hydriques a en effet été corrélé négativement à la défoliation. Chez Galiano *et al.* (2010) l'indice d'humidité topographique utilisé n'a pas cependant pas amélioré le modèle de défoliation. La profondeur du sol n'est ici pas ressortie comme significative dans la défoliation, mais une faible profondeur corrélée à une plus grande défoliation chez le Pin sylvestre a été mise en évidence chez Thauvin (2011) et Galiano *et al.* (2010).

Ce sont les versants chauds (IKR élevé), donc exposés sud, qui ont été significativement identifiés comme les plus défoliés dans notre étude, ce qu'on peut expliquer par des conditions favorables à la présence du gui et à un stress hydrique plus marqué en cas d'année caniculaire, le Pin sylvestre restant sensible aux extrêmes climatiques (Martínez-Vilalta & Piñol, 2002; Vennetier *et al.*, 2008; Thauvin, 2011). Pourtant, ce sont des peuplements présentant des expositions de secteurs nord (donc frais) qui se sont montrés plus sensibles au dépérissement en basse Provence et dans l'arrière-pays méditerranéen (Thabeet, 2008, Vennetier *et al.*, 2008), notamment en altitude dans les Alpes-Maritimes (Lelou, 2010). Or c'est sur ces versants que l'on trouve les stations les plus favorables à l'implantation du pin (Vennetier *et al.*, 2008). Pour expliquer cette dernière observation, l'hypothèse a été faite qu'il puisse s'agir d'un manque d'adaptation physiologique des peuplements de versant nord, moins bien acclimatés aux sécheresses intenses.

Dans cette étude, la limite de 1400m semble se démarquer par un taux de défoliation plus faible qu'aux altitudes intermédiaires. Cette limite était cohérente avec le seuil d'altitude à partir duquel le taux de gui diminue. Les peuplements les plus atteints identifiés par télédétection fin 2006 en région PACA témoigne d'une limite plus basse : inférieures à 1000-1200m (Thabeet, 2008). Mais de façon générale on retrouve un taux de dépérissement plus élevé à basse altitude. On retombe aussi sur cette conclusion par une approche dendrochronologique : une réduction de la croissance radiale a été observée spécialement sur les placettes de basse altitude, notamment après des périodes de sécheresse (Thabeet, 2008 ; Marqués *et al.*, 2016).

4.1.7 Validation des hypothèses

Sans dire que le climat n'a pas d'impact direct dans la défoliation du Pin sylvestre, aucune variable climatique n'est ressortie dans le modèle multifactoriel de défoliation de l'espèce en étudiant l'état sanitaire des arbres, et ce quelque soit l'altitude. Notre première hypothèse est invalidée. Dans cette étude le climat agirait plutôt indirectement sur le pin par l'intermédiaire du gui, qui est le principal responsable du dépérissement de l'essence ici.

Notre deuxième hypothèse, selon laquelle les agents biotiques possèdent une part prépondérante dans le dépérissement du Pin sylvestre, est validée. Avec un poids relatif respectif de 56% et 33%, le gui et les chenilles processionnaires du Pin occupent la première et deuxième place dans le dépérissement du Pin sylvestre étudié selon les modalités de cette étude.

4.1.8 Limites de l'étude

La méthode de correction des données pour passer du kilomètre au 50m peut être discutée, ne suivant pas une méthode validée scientifiquement. De plus, le fait que les données utilisées proviennent de l'hybridation de données de deux sources différents peut aussi être remis en cause : les méthodes d'acquisition et de traitement des données et les stations à partir desquelles elles ont été obtenues, différant selon les modèles. Enfin, le fait d'utiliser des moyennes trentenaires des données climatiques déprécie probablement l'effort de correction de l'échelle des données spatiales depuis le 1km vers le 50m.

Les modèles de risques de dépérissement et de risques de présence du gui élaboré montrent d'assez bonnes capacités de prédiction. Néanmoins une phase de terrain pour vérifier la concordance des modèles avec la réalité du terrain serait souhaitable afin d'émettre des hypothèses quant aux causes qui pourraient expliquer des discordances et d'étudier l'implication possible de facteurs non pris en compte lors de la phase de modélisation (aspects biotiques, caractéristiques des peuplements...).

La carte de vigilance a été établie sur la région PACA pour les conditions particulières du Pin sylvestre, qui se trouve en marge de son aire de répartition. La carte ne peut donc pas être étendue à l'échelle nationale. De plus elle n'est basée que sur des probabilités et son utilisation doit rester une aide à la décision et non être utilisée comme un outil de détermination de présence du Pin sylvestre. Enfin cette carte ne représente pas directement le risque de dépérissement de l'essence mais seulement le risque de présence du gui.

Conclusion et perspectives

La mesure de l'état sanitaire des placettes de Pin sylvestre en région Provence-Alpes Côte d'Azur a permis de quantifier et d'appuyer les quelques constats inquiétants de dépérissement déjà réalisés sur cette essence dans la région, et notamment la tendance à la hausse de la défoliation. Le modèle de défoliation s'est révélé être un relativement bon modèle pour attester du dépérissement du Pin sylvestre dans cette étude. Le gui a été identifié comme un facteur d'influence majeur. D'autres facteurs ont également pu être mis en évidence : les chenilles processionnaires, ainsi que l'indice topoédaphique, qui traduit la fertilité de la station via son bilan en eau. Si aucun paramètre climatique n'a été retenu, certains ont cependant pu expliquer la présence du gui et donc

indirectement le dépérissement du Pin sylvestre. Une carte de risque de dépérissement du Pin sylvestre via la probabilité de présence du gui a ainsi été générée. Bien que le Pin sylvestre soit une espèce pionnière et relativement résistante à la sécheresse, l'augmentation des températures, favorisent la présence de gui et la migration des insectes défoliateurs qui progressent en altitude et vers le Nord, rendant le pin plus vulnérable au climat. L'impact direct du stress hydrique sur le Pin sylvestre, montré dans de nombreuses études, n'est pas remis en cause, mais l'observation de l'état sanitaire de l'essence en un temps donné n'a pas permis de mettre en évidence l'influence prépondérante de paramètres climatiques dans cette étude du dépérissement. Ceci suggère que les facteurs biotiques jouent un réel rôle prédisposant dans le dépérissement, affaiblissant les arbres qui subissent de plus l'effet du réchauffement. Les zones plus élevées en altitude sont moins propices à la présence de gui en ce qui concerne la région PACA, ce qui suggère que le Pin sylvestre va connaître une remontée en altitude de son aire de répartition dans les montagnes alpines.

Les paramètres les plus influents dans le dépérissement du Pin sylvestre, parmi les paramètres climatiques, topographiques et dendrométriques ont été identifiés par observation de la défoliation et de la mortalité sur les placettes échantillonnées. Il serait maintenant intéressant de mettre en relation les paramètres climatiques, spécifiquement, avec les résultats issus de l'étude dendrochronologique complémentaire qui a été réalisée sur la productivité du Pin sylvestre sur les mêmes placettes cet été 2017, via l'étude des cernes de croissance (Perry, 2017). La base de données climatiques spatialisées SAFRAN donne accès à des données horaires de 1958 à 2016. Ainsi, des seuils critiques propres à l'essence pourrait être déterminés à partir d'années critiques identifiées par une baisse d'accroissement annuel moyen du Pin sylvestre : par exemple une limite de bilan hydrique climatique (P-ETP) sur la période de végétation, à partir de laquelle le Pin ne peut plus se rétablir après une baisse de croissance. De cette façon, grâce aux projections spatiales des scénarios climatiques disponibles jusqu'à 2100 sur le portail DRIAS^{les futures du climat}, il serait possible de projeter les résultats issus du modèle pour établir des cartes de vigilances climatiques temporelles. De cette façon l'évolution des peuplements de Pin sylvestre face au réchauffement climatique pourrait être anticipée.

Bibliographie

- Alexandrian, D. (1992). Essences forestières. In *Guide technique du forestier méditerranéen français* (2e ed), p. 96.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., ... Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, (259), p.660–684.
- Badeau V. ; Dupouey J.L. ; Cluzeau C. ; Drapier J. (2005). Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Forêt Entreprise, Dossier "l(162)*, p.25–29.
- Barbéro, M., Loisel, R., Quezel, P., Richardson, D. M., & Romane, F. (1998). Pines of the Mediterranean basin. In *Ecology and biogeography of Pinus*, p.153–170.
- 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 ? CO₂ 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.
- Hóðar, 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.

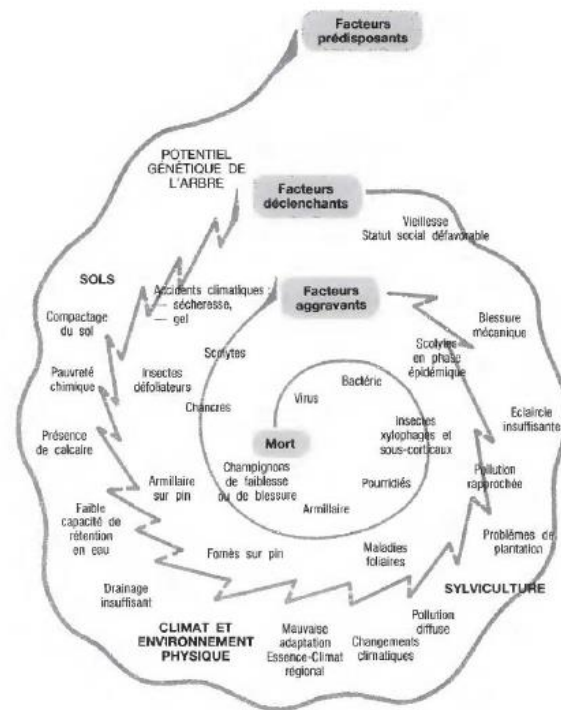
- Lemaire J et Maréchal N. (2011). Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques : comprendre et agir Forêt Entreprise n° 198 p 48 à 50. *Forêt Entreprise*, (198), p 48 à 50.
- Lemoine, B. (1977). Contribution à la mesure des pertes de production causées par la chenille processionnaire (*Thaumetopoea 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.drias-climat.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.
- Thornthwaite, 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*.

Annexes

Annexe 1: La « spirale du déclin » de Manion (1981) adaptée aux conditions françaises (Source : Landmann, 1994)	52
Annexe 2 Épisodes de dépérissement du Pin sylvestre constatés en Europe depuis le milieu du XXe siècle. (Source: Allen <i>et al.</i> , 2010)	52
Annexe 3: Carte de la mortalité du pin sylvestre observée dans les Alpes-Maritimes par l'ONF (source : Thauvin, 2011)	53
Annexe 4: Fiche de relever de terrain sur les placettes de l'étude	54
Annexe 5: : Photos de référence de l'état de défoliation de houppier de Pin sylvestre, prises sur le terrain. (Taux de défoliation, en pourcentage d'un houppier pleinement folié)	55
Annexe 6: 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).	56
Annexe 7: Résumé des variables utilisées dans les analyses statistiques.....	57
Annexe 8: Exemple de cartes de données topographiques et climatiques extraites des traitements SIG sur le logiciel Qgis.	59
Annexe 9: Spatialisation des placettes par classe de gui en fonction de l'altitude dans la région PACA	60

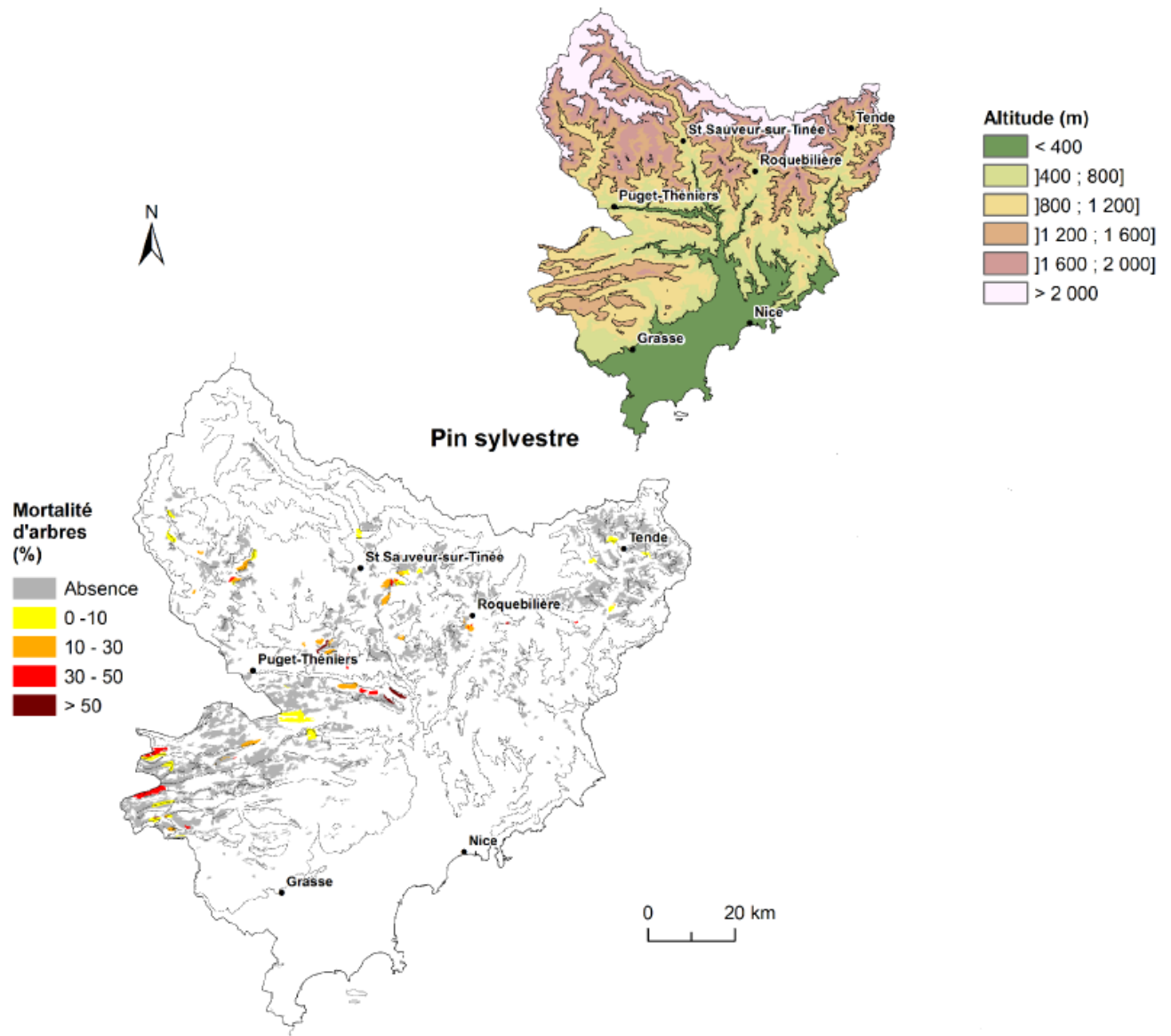
Annexe 1: La « spirale du déclin » de Manion (1981) adaptée aux conditions françaises (Source : Landmann, 1994)



Annexe 2 Épisodes de dépérissement du Pin sylvestre constatés en Europe depuis le milieu du XX^e siècle. (Source: Allen *et al.*, 2010)

LIEU	PÉRIODE	CAUSE(S) PRÉPONDERANTE(S)
Suisse (Valais)	1960-1976	Sécheresse de plusieurs années
Italie (sud Tyrol)	1992	Sécheresse de plusieurs années
Sud de l'Autriche	1990-1996	Sécheresse saisonnière
Autriche (Tyrol)	1991-1997	Sécheresse saisonnière
Italie (Aoste)	1985-1998	Sécheresse de plusieurs années
Espagne (Nord-Est, Centre et Sud)	1994, 1998	Sécheresse de plusieurs années
Autriche (Tyrol)	2001	Sécheresse saisonnière
Suisse (Valais)	1996-2004	Sécheresse de plusieurs années + fortes chaleurs estivales + scolytes
Espagne	2004-2006	Sécheresse de plusieurs années
Suisse (Grisons)	2003-2007	Sécheresse + fortes chaleurs
France (Provence, Alpes du Sud)	2003-2008	Sécheresse de plusieurs années + fortes chaleurs estivales+ scolytes

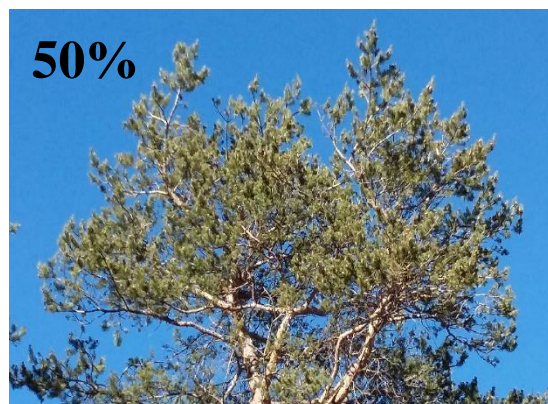
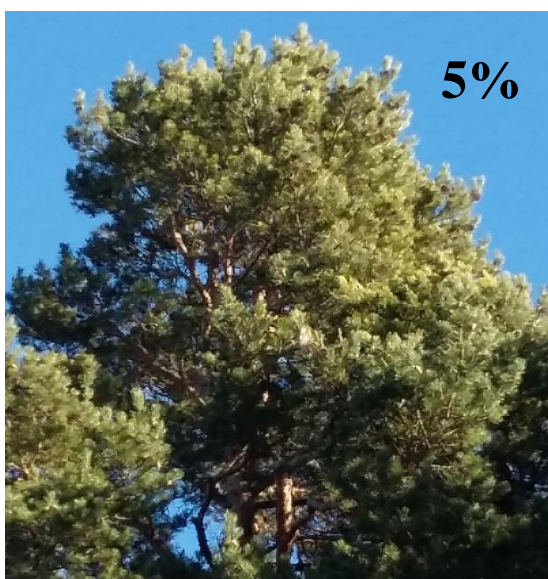
Annexe 3: Carte de la mortalité du Pin sylvestre observée dans les Alpes-Maritimes par l'ONF en 2011 (source : Thauvin, 2011)



Annexe 4: Fiche de relever de terrain sur les placettes de l'étude

C.N.T.		BioClimSol 2016		Bilan en eau	
Date : / / 2016		N°pl:			
References de la Parcelle		X Lambert 93 :		Y Lambert 93 :	
XW GS84 :		YW GS84 :			
Opérateur :		Commune :			
Propriétaire :					
Type de peuplement :					
Essences :					
Alt : m	Confinement : <input type="checkbox"/> oui fort <input type="checkbox"/> oui faible <input type="checkbox"/> non				
	Terrasse : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non				
Pente : Abs(< 5%) ou %					
ORI :	N <input type="checkbox"/> SE <input type="checkbox"/> O <input type="checkbox"/>				
	NE <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>				
	E <input type="checkbox"/> SO <input type="checkbox"/>				
Nature Roche Géologique					
Carte géol :					
Terrain si possible :		Géochimie de votre choix			
Affleurement rocheux (%) :		<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1-10 <input type="checkbox"/> 10-20 <input type="checkbox"/> 20-100			
PROFONDEUR (cm)	TEXTURE	EFFERVESCENCE HCL	ELEMENTS GROSSEMENT (%)	HYDROMORPHIE (0,1,2,3,4 & prof)	RUM (mm)
TOTAL RUM :					
Prof arrêt sondage (cm) à la tarière :					
Cause de l'arrêt :					
pH dans l'horizon Ah (20 cm de profondeur):					
Humus :					
UE/Guide de station :					
		ESSENCE			
Gtotale : m ² /ha					
Gess ppale : m ² /ha					
Gess sec : m ² /ha					
Age si possible : ans					
Dm	<input type="checkbox"/> 10 à 20cm	Rayon maximale prospection (m) pour trouver les 20 arbres <input type="checkbox"/> < 10 m <input type="checkbox"/> 20 à 30 m <input type="checkbox"/> 10 à 20 m <input type="checkbox"/> 30 à 40 m <input type="checkbox"/> > 50 m			
	<input type="checkbox"/> 20 à 40cm				
	<input type="checkbox"/> 40 à 60cm				
	<input type="checkbox"/> 60 à 80cm				
	<input type="checkbox"/> > 80 cm				
<input type="checkbox"/> IRRÉGULIER					
Ho	<input type="checkbox"/> 6 à 12m	Classe intensité niveau dépérissement Répartition dépérissement sur le peuplement <input type="checkbox"/> FAIBLE (< 5% tiges touchées) <input type="checkbox"/> ASSEZ FORTE (5 à 20% des tiges touchées) <input type="checkbox"/> FORTE (20 à 50% des tiges touchées) <input type="checkbox"/> TRES ELEVE (> 50% des tiges touchées) <input type="checkbox"/> ABSENCE			
	<input type="checkbox"/> 12 à 24m				
	<input type="checkbox"/> 24 à 32m				
	<input type="checkbox"/> > 32m				
	<input type="checkbox"/> IRRÉGULIER				
Classe de défoliation DEFIFOL: <input type="checkbox"/> c0 (0-5%) <input type="checkbox"/> c1 (6-20%) <input type="checkbox"/> c2 (26-50%) <input type="checkbox"/> c3 (51-75%) <input type="checkbox"/> c3+ (76- 95%) <input type="checkbox"/> c4 (96-100%)					

Annexe 5: : Photos de référence de l'état de défoliation de houppier de Pin sylvestre, prises sur le terrain. (Taux de défoliation, en pourcentage d'un houppier pleinement folié)



Annexe 6: 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).

		facteurs défavorables						facteurs neutres		facteurs favorables				
TOPOGRAPHIE	topographie générale	sommet	croupe	-14	haut de pente	-6	pente	-3	plateau	0	bas pente	10	val ou 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			
	Diadèses (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	lapis	-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	=		+		+		+		+		+	
-----------------------	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

Nota : lorsqu'une variable n'est pas observée on code 0

composition texturale		codage de la composition texturale			réserve utile en mm/cm
sable	limon	S	L	A	
0	0	0	0	0	1.75
0	1	0	1	1	1.85
0	2	0	1	2	1.8
0	0	0	2	0	1.5
0	1	0	2	1	1.95
0	2	0	2	2	1.85
1	0	1	0	1	1.55
1	1	1	0	2	1.7
1	0	1	1	0	1.3
1	1	1	1	1	2
1	2	1	1	2	1.75
1	0	1	2	0	1.45
1	1	1	2	1	1.82
1	2	1	2	2	1.78
2	0	2	0	0	0.7
2	1	2	0	1	1.35
2	2	2	0	2	1.55
2	0	2	1	0	1
2	1	2	1	1	1.5
2	2	2	1	2	1.6
2	0	2	2	0	1.3
2	1	2	2	1	1.6
2	2	2	2	2	2

Indices de correspondance avec la texture pour le calcul de la réserve utile

Annexe 7: Résumé des variables utilisées dans les analyses statistiques

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

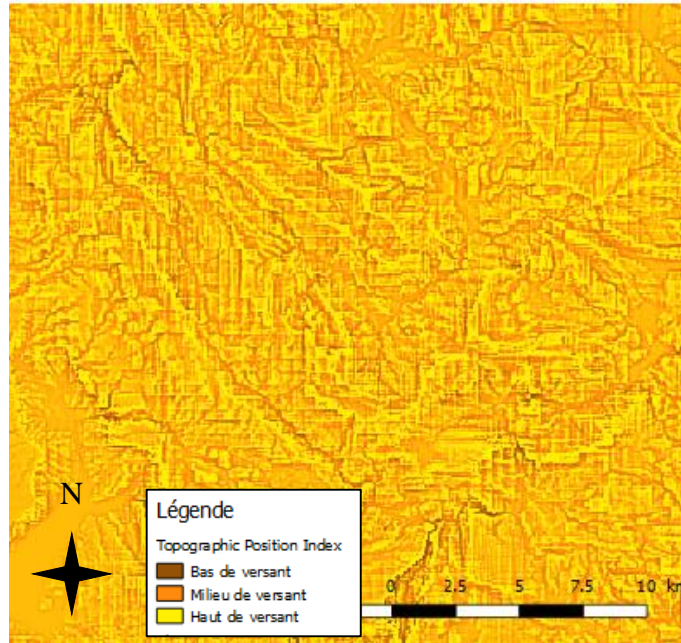
Les variables en gras correspondent à des variables calculées, celles normales à correspondent à des variables mesurées. Les mentions « données SIG » indique que les variables ont été obtenues à partir des modèles spatialisés.

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>
Puente	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

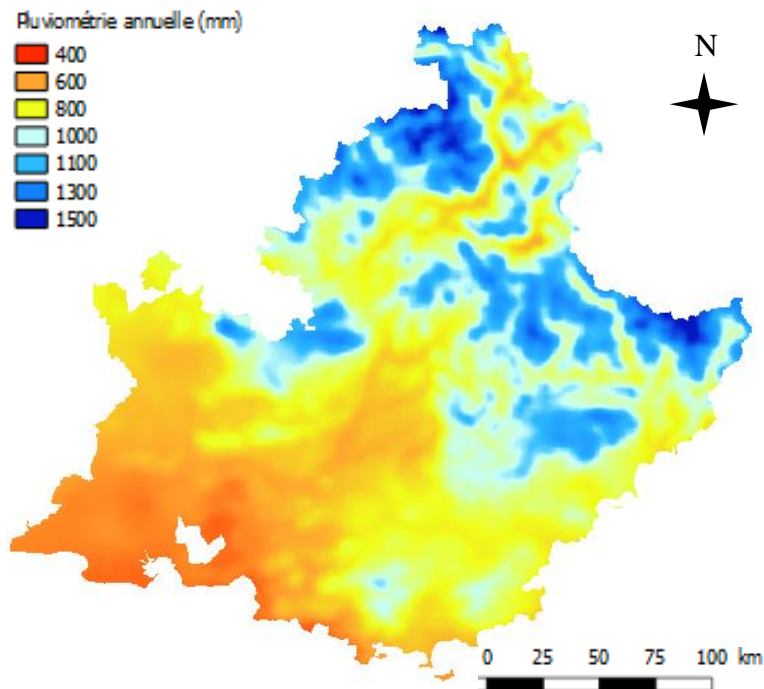
Gui_moy	Proportion de présence de gui (%) sur la placette
Gui_classe	Statut de la placette en fonction de la proportion de gui supérieure ou inférieure à 10% du houppier (GUIfaible ou GUIsup10)
PP_moy	Nombre moyen de nids de chenille processionnaires par arbre sur la placette
Decolo_moy	Décoloration 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 tx_depe_50 > 20% (sain20 ou depe20)
Tmoy01	Température moyenne du mois de janvier – <i>données SIG</i>
Tmoy02	Température moyenne du mois de février – <i>données SIG</i>
Tmoy03	Température moyenne du mois de mars – <i>données SIG</i>
Tmoy04	Température moyenne du mois d'avril – <i>données SIG</i>
Tmoy05	Température moyenne du mois de mai – <i>données SIG</i>
Tmoy06	Température moyenne du mois de juin – <i>données SIG</i>
Tmoy07	Température moyenne du mois de juillet – <i>données SIG</i>
Tmoy08	Température moyenne du mois d'août – <i>données SIG</i>
Tmoy09	Température moyenne du mois de septembre – <i>données SIG</i>
Tmoy10	Température moyenne du mois de octobre – <i>données SIG</i>
Tmoy11	Température moyenne du mois de novembre – <i>données SIG</i>
Tmoy12	Température moyenne du mois de décembre – <i>données SIG</i>
TX0608	Température moyenne maximale des mois de juin-juillet-août – <i>données SIG</i>
Tmoy	Température moyenne annuelle – <i>données SIG</i>
P_an	Pluviométrie moyenne annuelle – <i>données SIG</i>
P0608	Pluviométrie moyenne des mois de juin-juillet-août – <i>données SIG</i>
P0509	Pluviométrie moyenne des mois mai-juin-juillet – <i>données SIG</i>
P0410	Pluviométrie moyenne de la saison de végétation (avril à octobre) – <i>données SIG</i>
ETPanTURC	Evapotranspiration potentielle annuelle selon la formule de Turc – <i>données SIG</i>
P_ETP_an	Bilan hydrique climatique moyen annuel (Précipitation-Evapotranspiration) – <i>données SIG</i>
P_ETP0608	Bilan hydrique climatique moyen sur les mois de juin à août – <i>données SIG</i>
P_ETP0509	Bilan hydrique climatique moyen sur les mois de mai à septembre – <i>données SIG</i>
P_ETP0410	Bilan hydrique climatique moyen sur les mois d'avril à octobre – <i>données SIG</i>

Annexe 8: Exemple de cartes de données topographiques et climatiques extraites des traitements SIG sur le logiciel Qgis.

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



C) Exemple du raster d'un facteur climatique généré au 50m avec le logiciel Qgis : pluviométrie annuelle sur la moyenne trentenaire 1981-2010 issu du modèle AURELHY, zoom sur la région PACA



Annexe 9: Spatialisation des placettes par classe de gui en fonction de l'altitude dans la région PACA

Légende

Classe_Gui

- GUIfaible
- GUIsup10

Altitude (m)

- 0
- 200
- 600
- 1200
- 1400

