



## **Mémoire de master 1 : « Systèmes Écologiques »**

**Option : écosystèmes terrestres**

**FOURRIER Arnaud**

### **Mise en relation des facteurs stationnelles et bioclimatiques avec le dépérissement des sapinières du Mont Ventoux.**



**Maître de stage :** Davi Hendrik

**Laboratoire d'accueil :** INRA Avignon - UR629

Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes

Domaine Saint Paul, Site Agroparc.

84914 AVIGNON Cedex 9

Tel: +33.4.32.72.29.99 / Fax: +33.4.32.72.29.02

[http://www.avignon.inra.fr/internet/unites/rfm/equipe/davi/version\\_index\\_html](http://www.avignon.inra.fr/internet/unites/rfm/equipe/davi/version_index_html)

**Université de Bordeaux 1**

**UFR des Sciences Biologiques**

**Année universitaire 2006-2007**

## **Remerciements:**

Ce travail effectué au sein de l'INRA d'Avignon a été une expérience très enrichissante tant sur le plan humain que professionnel.

Tout d'abord, je tiens à remercier l'Unité de Recherche Forestière Méditerranéenne au sein de laquelle c'est déroulé mon stage et plus particulièrement les techniciens et chercheurs de l'équipe Croissance et conduite des Peuplement Forestiers avec qui j'ai travaillé : Florence Coudrier, Nicolas Mariotte, William Brunetto, Philippe Dreyfus et Hendrik Davi.

Le travail de terrain réalisé sur le versant nord du Mont Ventoux dans un cadre géographique et paysager exceptionnel a été une véritable partie de plaisir grâce à leur soutien et leur bonne humeur. De plus, le partage de leurs connaissances du milieu et de sa flore m'a été très bénéfique.

La rencontre et les conversations avec les nombreux stagiaires et doctorants de l'URFM, Gwendal, Maxime, Laurent, Thomas... ont été très enrichissantes.

Je n'oublie pas Annabelle Amm, doctorante (équipe génétique et équipe croissance) pour son aide précieuse sur le terrain et ses conseils lors de l'analyse des données.

Pour finir, je voudrais remercier mon maître de stage Hendrik Davi de m'avoir confié ce travail captivant et aussi pour son accueil. Il m'a permis de m'intégrer très vite à l'équipe. De plus son soutien et son aide lors de la rédaction du mémoire m'ont été très bénéfiques.

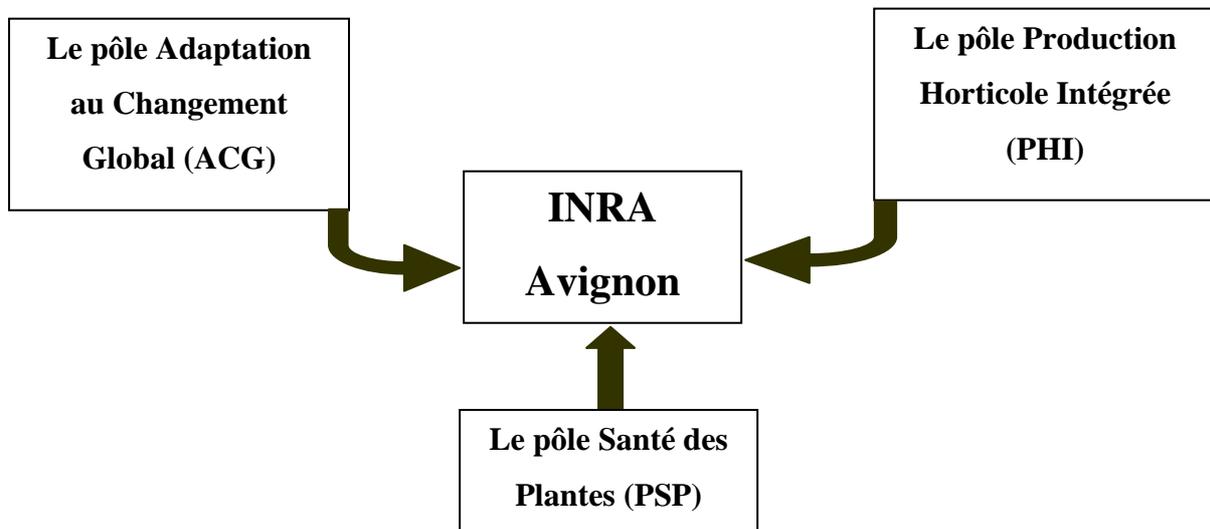
## Présentation de l'INRA d'Avignon :

D'une façon générale, cet organisme de recherche publique travail au service d'enjeux de société majeurs que sont l'alimentation, l'agriculture et l'environnement.

Les principales missions de l'INRA sont :

- la production et la diffusion de connaissances scientifiques
- la conception et l'innovation de savoir-faire pour la société
- l'expertise et l'aide à la décision des acteurs publics et privés
- la formation à la recherche

Le centre de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) méditerranéen a été fondé en 1953 et compte 580 agents permanents répartis en 27 Unités distribuées sur 8 sites principalement en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur mais aussi en Rhône-Alpes et en Languedoc-Roussillon, cependant 82 % des effectifs se situe au centre d'Avignon. Les axes de recherches principaux du centre s'organisent autour de trois pôles de compétences :

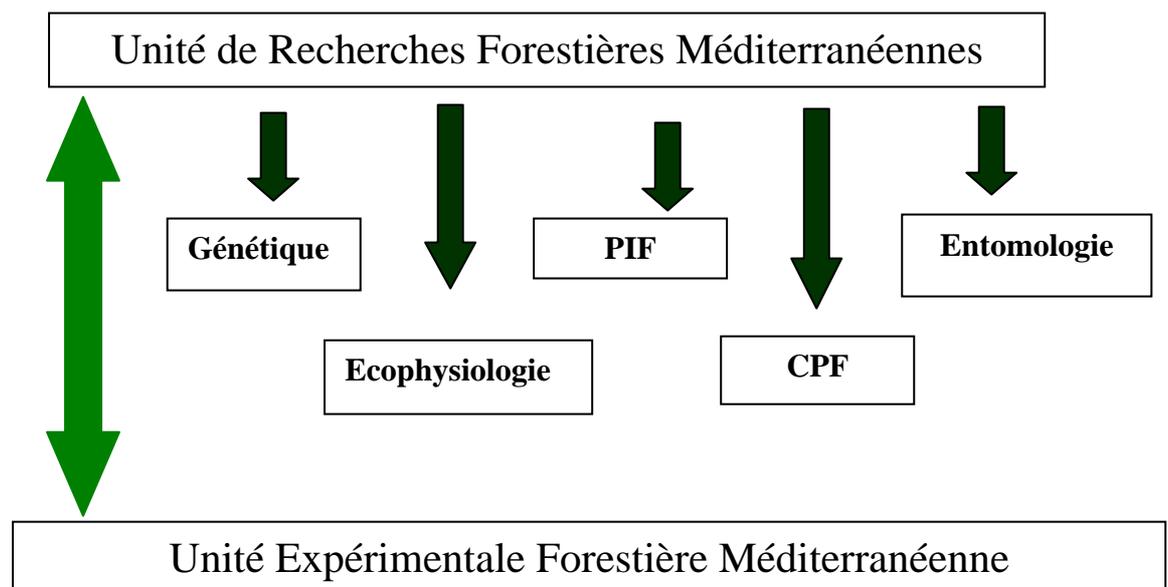


A l'intérieur du pôle ACG, ce trouve l'Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes qui m'a accueilli. Cette dernière mène des recherches pluridisciplinaires en écologie sur les écosystèmes forestiers méditerranéens, pour mettre en œuvre des outils de gestion durable dans le contexte du changement global.

Les thèmes de recherches auxquels appartiennent respectivement les 5 équipes de l'URFM sont :

- La description de la diversité des ressources **génétiques** forestières méditerranéennes
- La modélisation de la croissance des arbres et des peuplements, équipe **Croissance et conduite des Peuplements Forestiers**(CPF)
- La modélisation des processus démo-génétique de la dynamique des peuplements, équipes **Génétique** et **Croissance et conduite des Peuplements Forestiers**
- la biologie et la dynamique des populations d'insectes ravageurs, équipe **Entomologie** forestière.
- la modélisation du comportement du feu de forêt, éclosion et propagation, évaluation du risque d'incendie, équipe **Prévention des Incendies de Forêt** (PIF).
- sur l'impact du passage du feu, des incendies et du brûlage dirigé, sur la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes, équipe **Prévention des Incendies de Forêt**.
- La réponse **éco physiologique** des peuplements mélangés aux conditions climatiques méditerranéennes.

Ces recherches s'appuient sur un réseau expérimental conséquent en forêt méditerranéenne suivi sur le long terme, en collaboration avec l'Unité Expérimentale Forestière Méditerranéenne (UEFM).



### **Travaux et enjeux de l'équipe CPF :**

L'équipe Croissance et conduite des Peuplements Forestiers qui m'a encadré, est composée de 6 agents permanents (3 chercheurs, 1 assistante ingénieur et 2 techniciens) et encadrée par P. Dreyfus. Ils travaillent notamment sur l'identification et la modélisation des relations de croissance des arbres et de dynamique des peuplements (régénération, structuration, production et mortalité) en fonction des conditions du milieu et de la compétition. Ces différents programmes nécessitent de nombreuses données acquises dans tout le Sud-Est et plus particulièrement dans la Mont Ventoux. Ces études concernent des espèces méditerranéennes et / ou montagnardes telles que le sapin pectiné (*Abies alba*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) ainsi que 4 espèces de pins, sylvestre (*Pinus sylvestris*), d'Alep (*Pinus halepensis*), noir d'Autriche (*Pinus nigra ssp austriaca*), à crochets (*Pinus uncinata*).

Les thèmes de recherche qui étaient centrés principalement sur la croissance et la production de peuplements, s'orientent depuis une dizaine d'années vers des études de dynamique forestière, recolonisation et comportement face aux changements globaux.

## Tables des matières

I) Introduction .....	1
<b>1) Contexte de l'étude</b> .....	<b>1</b>
<b>2) Objectifs de l'étude</b> .....	<b>2</b>
II) Matériel et méthodes.....	2
<b>1) Site d'étude : le Mont-Ventoux</b> .....	<b>2</b>
<b>2) Protocole d'étude</b> .....	<b>3</b>
<i>a/ Choix du transect et de l'emplacement des placettes</i> .....	3
<i>b/ L'installation des placettes</i> .....	4
<i>c/ Inventaire dendrométrique et description sanitaire</i> .....	4
<i>d/ Description stationnelle et pédologique</i> .....	5
<b>3) Traitement et analyse des données</b> .....	<b>5</b>
III) Résultats :.....	5
<b>1) Structure du peuplement</b> .....	<b>6</b>
<b>2) Positionnement du dépérissement du sapin sur le transect</b> .....	<b>6</b>
<i>a/ Etat sanitaire</i> .....	7
<i>b/ Catégories d'état sanitaire du sapin</i> .....	8
<b>3) Modèle linéaire généralisé (GLM)</b> .....	<b>8</b>
IV) Discussion .....	9
Conclusion .....	10

## 1) Introduction

En réponse au changement climatique, dans le Sud de l'Europe, les experts de l'IPCC (2007) prédisent d'ici 2100, une augmentation des températures surtout en été, de 2,2 à 5,1°C. La diminution des précipitations annuelles serait de -4 à -27% avec un déficit marqué en été. Nous observons déjà en France de 1956 à 1997 (Lebourgeois *et al.* 2001, sur 68 stations), une augmentation de 1,2°C de la température moyenne annuelle avec des tendances encore plus fortes en été. La fréquence des extrêmes climatiques et des sécheresses édaphiques risquent d'augmenter. Déjà identifiées comme des causes du dépérissement passé des sapinières vosgiennes (Lévy et Becker, 1987 ; Bert, 1992), les sécheresses risquent de changer radicalement la répartition des peuplements végétaux. Certains auteurs (Badeau *et al.* 2005) prévoient une progression de la végétation thermophile (atlantique et méditerranéenne) au détriment de la végétation alpine, montagnarde et continentale.

Si de nombreuses recherches ont estimé l'effet des changements climatiques sur la productivité des forêts (approche dendroécologique), peu se sont intéressées à leurs effets sur les mécanismes et facteurs déterminants le dépérissement et la mortalité à une échelle locale. Nous étudierons ici les risques de dépérissement du sapin pectiné (*Abies alba*, Miller.) dans l'arrière-pays méditerranéen. Le dépérissement de cette espèce de première importance économique et écologique, est observé périodiquement en Europe depuis 1500 (Cramer, 1984) mais les causes du déclin restent encore mal connues (Bigler *et al.* 2004). L'expression de « complexe de causes » semble appropriée au dépérissement observé du sapin dans lequel, les facteurs seraient fonction de la région et de l'époque (Becker, 1987).

Suite à la sécheresse de l'été 2003 et aux déficits hydriques des années suivantes, de forts dépérissements sont observés sur de nombreux peuplements forestiers (Pauly, 2006). En région méditerranéenne, ce phénomène est particulièrement important pour le pin sylvestre et le sapin pectiné. Il intervient dans des contextes biologiques différents : respectivement pour des essences de début et de fin de succession des étages supra-méditerranéens à montagnards.

### **1) Contexte de l'étude**

Cette étude concerne les sapinières méditerranéennes, dites « sapinières sèches », où l'impact des changements climatiques est d'autant plus fort que cette espèce sensible à la sécheresse est proche de la limite sud de son aire de répartition. Dans le Vaucluse sur le Mont-Ventoux, elles sont en dynamique de recolonisation sous couvert de pins sylvestre et de pins à crochets plantés dans le cadre de boisements pour la « Restaurations des Terrains en Montagne » (RTM). Paradoxalement, on observe aussi, surtout depuis 2003, une augmentation importante du dépérissement du sapin considéré comme « intermédiaire ». En effet, il existe différents degrés de dépérissement allant de

fort dans les Alpes maritimes et l'Aude à faible dans les Alpes de Haute Provence. Aujourd'hui nous avons étudié ce phénomène *in situ* (échelle locale) sur le versant Nord. Il est primordial de mettre en évidence les facteurs déterminants du dépérissement forestier afin de minimiser l'impact du climat par une gestion sylvicole adaptée.

## **2) Objectifs de l'étude**

Mon travail s'inscrit dans le projet national d'étude de 4 ans nommé « Dryade : *Vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques : de l'arbre aux aires bioclimatiques* » financé par l'Agence Nationale pour la Recherche. L'Unité de Recherches Forestière Méditerranéenne de l'INRA, Centre d'Avignon, est en charge d'un volet portant sur le sapin dans l'arrière-pays méditerranéen. Les dépérissements sont plus forts à basse altitude, cet effet altitudinal est traité par ailleurs dans le projet. Ici, nous centralisons notre étude sur un transect le long d'une courbe de niveau, en exposition nord, afin de comparer les conditions stationnelles et biotiques sur un échantillon de placettes assez homogènes sur le plan bioclimatique. Par la suite, ces placettes serviront à établir des relations entre niveau de dépérissement observé *in situ* et sur photographies aériennes. A terme, l'objectif est d'établir des relations entre le niveau de dépérissement et les facteurs biotiques et abiotiques facilement observables à de larges échelles, afin de réaliser des cartes de risques pour y ajuster les modes de gestion.

Dans le cadre de mon stage, j'ai dégagé des premières tendances sur les causes biotiques (structure du peuplement et effet de compétition) et abiotiques (conditions stationnelles et géopédologiques) du dépérissement. L'effet des défoliateurs et insectes sous-corticaux (scolytes) sont étudiés parallèlement par l'équipe d'entomologie de l'URFM.

Mon travail a consisté par ordre chronologique, à élaborer un protocole de description du peuplement et d'observation du dépérissement, à l'appliquer sur le terrain et à analyser statistiquement et graphiquement les données (dendrométriques, stationnelles et sanitaires).

## **II) Matériel et méthodes**

### **1) Site d'étude : le Mont-Ventoux**

Ce massif culmine à 1909 m. Il s'étend d'ouest en est sur 24 kilomètres. Il est formé de deux versants dissymétriques, un méridional à pente relativement douce et un septentrional très abrupt (zone d'étude). Ce dernier se divise en deux secteurs, un oriental orienté N à NE et un occidental orienté O à NO (site étudié) qui occupe environ 40% de la longueur du massif. Ce secteur de pente moyenne supérieure à 40° est parcouru par plusieurs combes, d'où des microclimats assez variés.

Sur la quasi-totalité du Ventoux, le substratum géologique est calcaire. La partie NO du versant septentrional est constituée de calcaire dur et compact qui, suite à l'action de l'eau et des phénomènes de gélifraction donne naissance à des champs d'éboulis qui se désagrègent en éléments de plus en plus fins. Ce versant, la plupart du temps, est surmonté par une paroi rocheuse, abrupte, haute de quelques mètres. Suite aux dégradations qu'a connues le massif, les sols sont peu évolués, de type lithosols, rendzines ou très localement rendzines brunifiés. Sur de rares zones, sans doute jamais déboisées, - quelques sapinières situées en ubac -, on trouve des sols plus matures de type brun acide. Sur sols superficiels, la terre fine est limoneuse et humifère, de couleur noire. Pour des substrats plus profonds, la texture est limono-argileuse voir argilo-limoneuse pour les plus évolués.

L'Homme a fortement marqué l'histoire du massif, en fonction des différentes périodes et de ses activités (pâturage, agriculture, coupes...). La surface forestière a connu plusieurs phases d'extensions et de régressions au cours des siècles passés. La situation critique du XVIII<sup>ème</sup> siècle et suite à plusieurs catastrophes meurtrières (inondation et glissement de terrain), une première loi en 1860 est votée pour la restauration et conservation des terrains de montagnes (RTM) qui se poursuivront jusqu'en 1936 sur le versant Nord.

## **2) Protocole d'étude**

La méthode d'ensemble a été élaborée en collaboration avec l'équipe Croissance et conduite des Peuplements Forestiers (CPF) au cours de plusieurs réunions et la rédaction de ce dernier a fait partie intégrante de mon stage. Deux documents ont servi de base, le protocole SYLVAPYR (Maugard *et al.*, 2006), utilisé par le Département « Santé des Forêts » (DSF) pour le suivi du dépérissement du sapin dans les Pyrénées et le travail de J. Ladier (ONF, 2004) sur « Les stations forestières des Préalpes sèches » pour l'aspect stationnel et morphopédologique. La seconde étape de mon travail a consisté à décrire le peuplement en différents points de sondage (placettes) sur le transect. Le principe d'échantillonnage est systématique, sans présélection. La seule contrainte a été l'homogénéité des placettes d'un point de vue structure et composition du peuplement. L'échantillonnage stratifié a été écarté car trop arbitraire quant à la différenciation des faciès. En effet, il pourrait occulter des facteurs primordiaux pour la compréhension du dépérissement des sapinières non directement visibles par l'observateur. Au préalable, nous avons acquis les informations sur le passé sylvicole des placettes auprès des acteurs concernés (DSF, ONF).

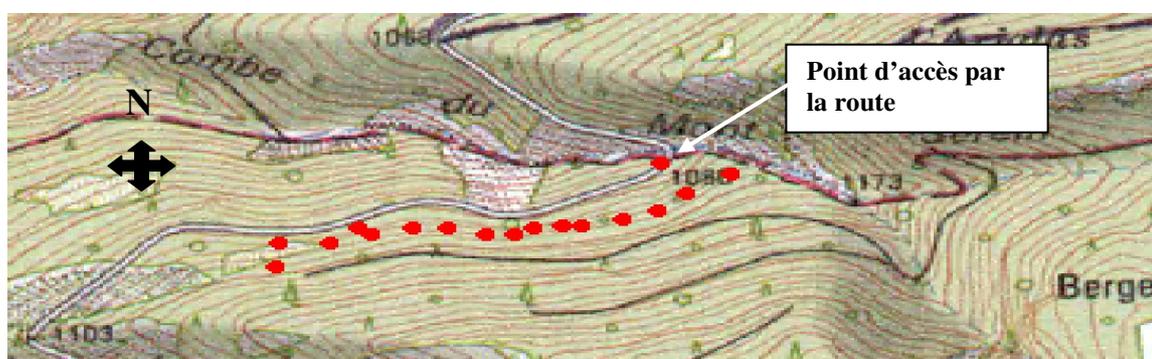
### **a/ Choix du transect et de l'emplacement des placettes**

La zone d'étude choisie est le versant occidental de la combe du Mont-Serein. Elle mesure 800 m de long, est homogène au niveau bioclimatique avec une exposition nord et une altitude comprise entre

1100 m (piste du col du Comte) et 1150 m. Elle correspond à la hêtraie-sapinière dite « chaude » située dans l'étage Montagnard Inférieur d'Ubac (MIU), entre 900 et 1300 mètres d'altitude. On y observe des zones saines et dépérissantes relativement proches. Sur ce transect, découpé en tronçons de 50 m, 16 placettes ont été installées et décrites.

#### b/ L'installation des placettes

L'installation consiste à mettre en place de placettes permanentes, carrées, délimitées physiquement (piquets bleus aux 4 coins + 1 piquet central rouge) et repérées géographiquement (relevé GPS du piquet central). Chacune couvre une surface horizontale de 400 m<sup>2</sup> (une correction des distances en fonction de la pente a été effectuée). Pendant l'inventaire le contour de la placette est délimité l'aide de décimètres.



**Figure 1 : Carte du transect en courbe de niveau, (les placettes sont numérotées de gauche à droite, de 1 à 16).**

#### c/ Inventaire dendrométrique et description sanitaire.

Cette phase de terrain a occupé une grande partie de la durée de mon stage. Elle est essentielle quant à la caractérisation du peuplement forestier de façon quantitative (nombre de tiges à l'hectare, densité et surface terrière) et qualitative (santé des arbres et du peuplement). L'inventaire, réalisé avec le soutien technique et scientifique de l'équipe CPF, a permis de déterminer :

##### La Structure du peuplement :

La présence de souches d'abattage, leur diamètre et leur âge approximatif (selon leur état de décomposition) est indiqué (indication sur le passé du peuplement). Tout individu supérieur à 1,3 mètre de hauteur est dénombré et l'espèce est notée; sa circonférence est mesurée si la tige a un diamètre supérieur ou égal à 100 mm (à 1,3 m du sol). Ensuite, les 5 individus (dépérissant ou vivant) ayant la circonférence la plus forte, ont été numérotés, mesurés en hauteur totale et la hauteur de la base du houppier, côté en amont et côté aval a aussi été estimée.

##### L'état sanitaire:

L'état de santé de chaque arbre supérieur à 1,3 mètre de hauteur a été estimé selon quatre niveaux : individu (i) sains, (ii) dépérissants, (iii) secs récemment et (iv) secs plus ancien. Les dépérissants sont

identifiés en fonction de la coloration anormale du feuillage (jaunissement) et de la présence de branches sèches. Le distinguo entre sec récent et ancien se fait selon que la perte des aiguilles est totale ou pas. Les récents ont encore une majeure partie du feuillage (rougissement) alors que les anciens sont totalement défoliés. Toutes les remarques complémentaires sur l'état de l'arbre ont été notées : la forme, les attaques de parasites ou les dégâts d'éboulis.

#### d/ Description stationnelle et pédologique

Cette appréciation du milieu est essentielle pour la mise en relation du dépérissement observé avec le type morphogéopédologique. La description morphogéopédologique comprend deux volets. En premier, sur le terrain, la pente est mesurée et la topographie locale est classée selon trois types: (neutre ou rectiligne, concave et convexe). Ces critères permettent d'établir un bilan topographique par placette. En second, un profil pédologique est ouvert à proximité du centre de la placette, où sont observées et décrites, les caractéristiques des horizons mis à jours (profondeur, proportion et nature des éléments grossiers (EG), texture et structure, prospection racinaire en 4 niveaux : 0 = absence d'enracinement, 1 = faible, 2 = bon à 3 = très bon) et la profondeur de l'horizon C. D'après Ladier (2004), la potentialité en eau du sol dépend de sa charge en éléments grossiers et de la profondeur du profil. Ainsi, 4 types de profils pédologiques sont distingués (0<nul<20cm, =<20cm faible, =<50cm moyenne, >50cm forte). Ces critères permettent d'établir le bilan édaphique. En croisant le bilan topographique et édaphique, nous estimons la capacité hydrique par placette. Selon ce protocole, elle s'échelonne de très sec à très frais. Nous avons complété par 4 sondages du sol (par placette) à la barre à mine afin d'apprécier la variabilité intraplacette de la profondeur du sol et d'estimer une moyenne.

### **3) Traitement et analyse des données**

Les informations de terrain ont été rassemblées dans un tableau de données brutes à partir duquel plusieurs types de calculs ont été entrepris pour aboutir à la création de 55 variables. Seules les variables expliquant de façon significative ou offrant des pistes sur la compréhension du phénomène de mortalité seront explicitées ici. Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide des logiciels R et Mat Lab et la spatialisation avec le SIG libre, GRASS.

### **III) Résultats :**

Dans ce qui suit, par commodité, et sauf indication contraire, le terme « dépérissant » est appliqué à tout type de sapin mort ou en déclin.

## 1) Structure du peuplement

La hauteur moyenne des 5 arbres dominants, composés à 87% de sapins, est de 15,3m pour une

circonférence moyenne de 1203,7 mm. La Figure 2 montre une augmentation de la hauteur moyenne à partir de la placette 10 (> à 15m), excepté pour la 14.

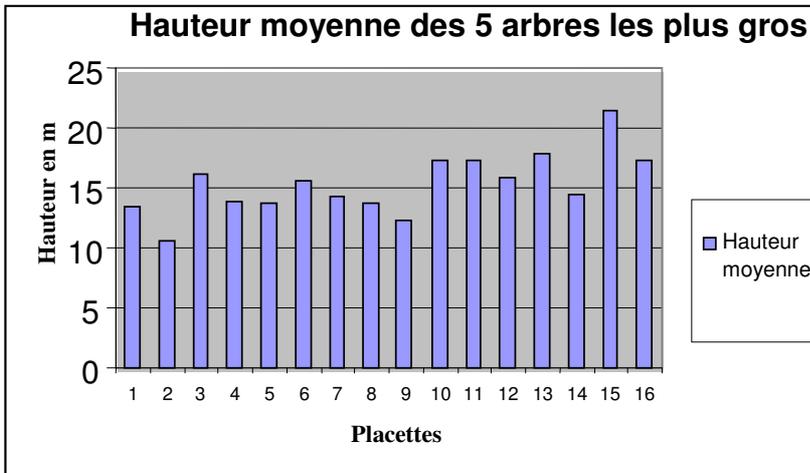


Figure 2 : Histogramme de hauteur moyenne des dominants.

D'après la figure 3, la surface terrière totale (toutes espèces) est très variable d'une placette à l'autre avec une légère tendance à l'augmentation à partir de la 11 (sauf pour les 12 et 14).

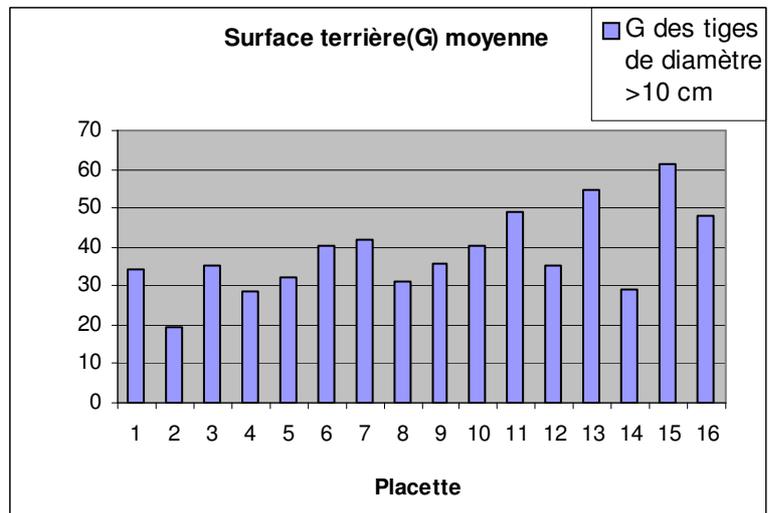


Figure 3 : Histogramme de G moyenne en m²/ha.

## 2) Positionnement du dépérissement du sapin sur le transect

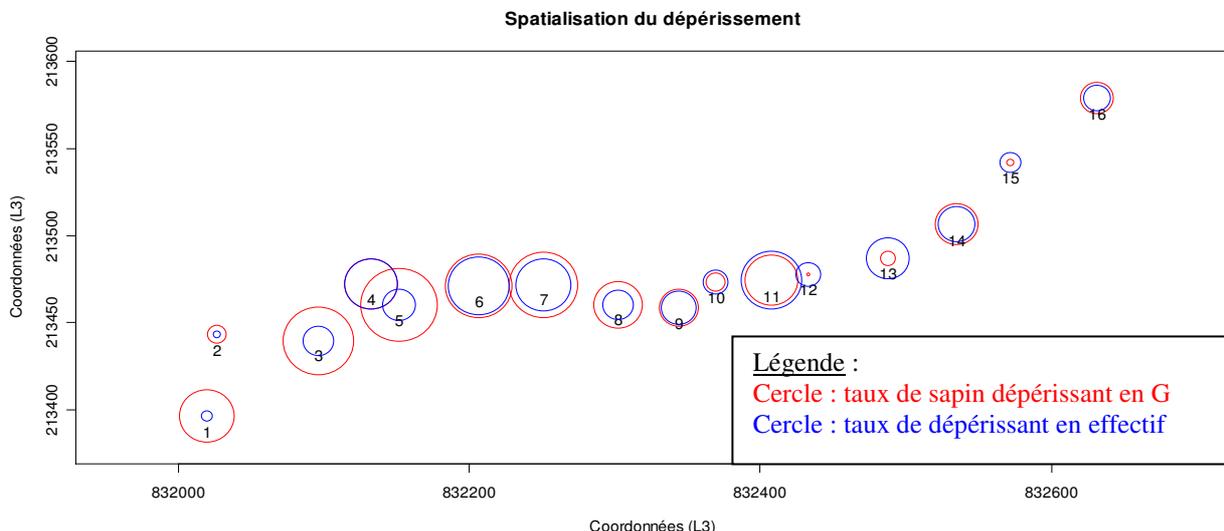


Figure 4 : Quantification du dépérissement sur le transect.

De façon générale, deux zones de dépérissements en surface terrière (G) peuvent être distinguées sur la figure 4 :

-une zone de fort dépérissement, pour les placettes 1 à 9 (hormis 1 a 2), avec une diminution sur la 8 et 9.

-un dépérissement plus faible pour le segment des placettes 10 à 16 (à l'exception de la 11, 13 et 14).

a/ Etat sanitaire

Individus concernés	Moyenne du transect	
	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	Effectif (t/ha)
<b>Total toutes espèces</b>	<b>38,53</b>	<b>6181</b>
<b>Total sapin</b>	<b>27,35 (71%)</b>	<b>2371 (38%)</b>
<b>Sapin sec récent</b>	<b>7,10 (18%)</b>	<b>608 (10%)</b>
<b>Sapin sec ancien</b>	<b>4,47 (12%)</b>	<b>630 (10%)</b>
<b>Sapin dépérissant</b>	<b>4,83 (12%)</b>	<b>744 (12%)</b>

Tableau 1 : Récapitulatif des valeurs moyennes en G et en effectif.

Le sapin représente 71% de la G du peuplement, mais seulement 38,4% des effectifs totaux. En moyenne sur le transect, on observe que 42,6% en G et 35,5% en effectifs des sapins sont morts ou dépérissants. Le ratio entre taux de dépérissement en surface terrière et celui en effectif (indice du type de dépérissement<sup>1</sup>) est de 1,2;

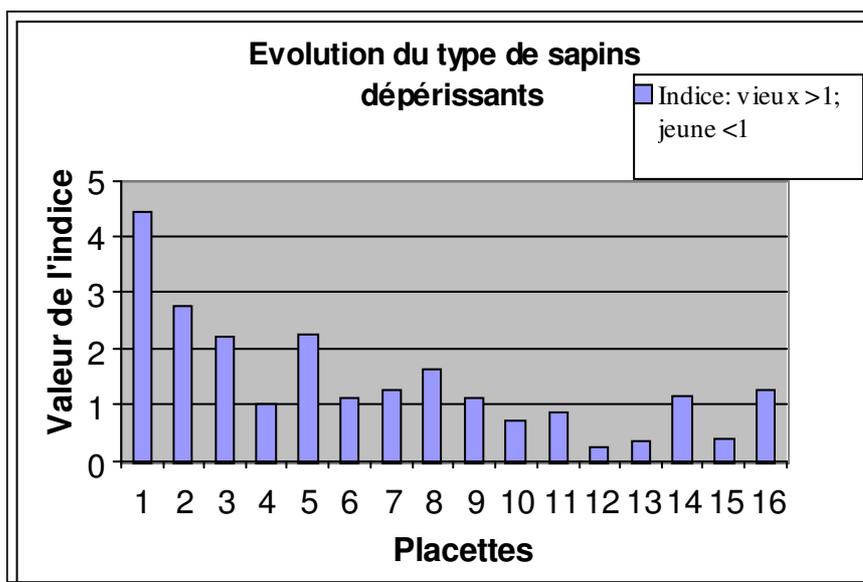


Figure 5 : Histogramme de l'indice de dépérissement sur le transect.

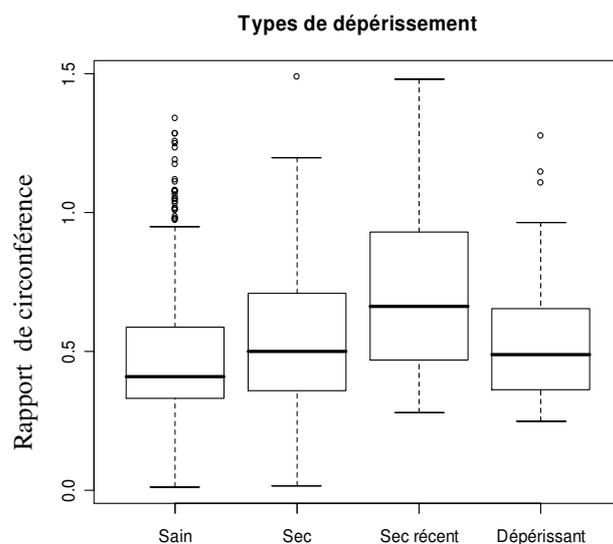
cela signifie que les sapins dépérissants ont une forte surface terrière en moyenne.

D'autre part, sur la figure 5, de la placette 1 à 9, le dépérissement touche les grandes circonférences (indice > ou =1) alors que de 10 à 16 se sont les plus petites, hormis les placettes 14 et 16. Cette tendance est significative : plus on s'éloigne de la combe, plus l'indice augmente (modèle linéaire avec une **p-value** de **0.00132\*\*** et **R<sup>2</sup>** égal à **0.4996**).

<sup>1</sup>  $(G_{\text{sapin dep}}/G_{\text{sapin}}) / (nb_{\text{sapin dep}}/nb_{\text{sapin}})$

b/ Catégories d'état sanitaire du sapin

Nous avons regardé s'il existait une différence de catégories sanitaires (sain, sec récent, ancien et dépérissant) en fonction de « l'âge » (supposé bien relié à la circonférence) pour le relier au résultat précédent. Le rapport (circonférence individuelle/ moyenne de circonférence de 5 arbres dominants) permet de normaliser les données et de regarder la circonférence en fonction du type de dépérissement (effet « âge ») à comparer ultérieurement avec la figure 5. La figure 6 montre que les secs récents ont tendance à être des arbres plus gros que les autres catégories.



**Figure 6 : Boxplot de distribution des circonférences par catégorie d'état sanitaire.**

### 3) Modèle linéaire généralisé (GLM)

Une analyse en composante principale (ACP) a permis de repérer d'abord les variables biotiques et abiotiques qui pourraient avoir une influence sur le dépérissement.

Ensuite, le GLM a été réalisé entre le taux de dépérissement en G, et les variables semblant influencer sur le dépérissement. Enfin, la procédure de « stepwise » dans R, permet de sélectionner les variables qui entreront dans le modèle.

Variables	Coefficient de corrélation	P_value	Significativité du test
Terre fine	-1,7602	0.046825	*
Affleurement rocheux	-0,3698	0.204670	
Profondeur moyenne du sol	0,998	0.289614	
Surface terrière totale	0,9121	0.093980	.
Indice de Shannon	34,4483	0.037233	*
Taux.sapin.G	1,6199	0.003932	**
Indice du type de peuplement en sapin	-3,8459	0.047328	*

**Tableau 2: Récapitulatif du GLM, variables "explicatives" du taux de dépérissement du sapin en G**

Une relation positive existe entre la profondeur moyenne du sol, l'indice de Shannon, la surface terrière en sapin, la G totale et le taux de dépérissement en sapin (G). Plus ces variables augmentent plus le taux de dépérissement est élevé. La relation est négative pour les variables affleurement rocheux, terre fine et l'indice du type de peuplement en sapin sains et dépérissants. La normalité des résidus a été testée, ils suivent une loi normale.

Le  $R^2$  entre les valeurs du taux de dépérissement prédites par le modèle et les valeurs réelles, est de 0.82.

## IV) Discussion

Il semble que vers l'extrémité Est du transect, donc en s'approchant de la combe, le sapin bénéficie de conditions plus favorables pour son développement puisque sa hauteur et sa surface terrière augmentent sensiblement (sauf exception). Toutefois, d'autres facteurs peuvent intervenir, sur ces caractéristiques dendrométriques, notamment les perturbations anthropiques passées ou présentes (effet des coupes sylvicoles). De plus la régulation stomatique du sapin contre la cavitation implique une fermeture rapide et complète des stomates (Guicherd, 1984), qui de manière récurrente peut l'exposer à des carences minérales (Potočić *et al.* 2005) et à une assimilation carbonée réduite. De ce fait, il est plausible que sur le début du transect (est), il soit exposé à de conditions climatiques et hydriques plus extrêmes limitant sa croissance et son développement. On peut supposer que la combe joue un effet tampon (microclimats frais) sur les accidents climatiques comme l'atteste la diminution de « l'indice du type de dépérissement » donc de gros sapins morts ou en déclin sur la fin du transect. La mortalité des tiges plus jeunes près de la combe peut être due à leur statut concurrentiel (dominé) qui limite leur approvisionnement en eau (Becker et Lévy, 1988).

D'autre part, la position topographique influe sur la profondeur des sols et leur capacité à retenir l'eau, causes clairement identifiées du dépérissement des sapinières vosgiennes (Lévy et Becker, 1987; Bert, 1992). La convexité du relief avec la forte pente (>40°) amplifierait l'impact des sécheresses sur le début du transect d'où une forte proportion d'arbres « âgés » touchés par la mortalité. Ils influencent notamment la qualité nutritionnelle et la capacité hydrique du sol, causes du dépérissement des sapinières vosgiennes (Thomas *et al.* 2001).

Une corrélation positive (toutefois non significative) entre le taux de dépérissement (G) et la profondeur moyenne du sol peut paraître étonnante. Cela peut être dû à la méthode utilisée pour sonder le sol qui ne pas compte de l'état de fissuration de la roche mère importante pour la prospection racinaire. L'augmentation du dépérissement avec les surfaces terrières (totale et en sapin) peut-être une cause aggravante de la compétition des arbres pour les ressources surtout en conditions limitantes (Becker, 1990). La relation négative entre l'âge du peuplement en sapin (Indice du type de peuplement en sapin) et le dépérissement confirme l'effet du microclimat à proximité de la combe assurant la vitalité des sapins « âgés ». Les relations trouvées entre variables environnementales et taux de dépérissement restent à détailler et sont à « prendre avec du recul ». En effet, déterminées à partir de 16 points, les variables environnementales ne couvrent, parfois, qu'une faible gamme de valeur. Ce modèle risque de ne pas être utilisable pour d'autres situations. Il est nécessaire de retravailler le modèle, en essayant de créer un modèle plus simple applicable à toutes les situations.

L'occurrence de tâches de dépérissement dans des zones, ayant a priori de bonnes conditions stationnelles et structurales, nous oriente vers la recherche de nouvelles méthodes d'études des facteurs abiotiques et à y joindre d'autres facteurs biotiques. Toutes agressions qu'elles soient biotiques (ravageurs défoliateurs et sous-corticaux, effet des coupes) ou abiotiques (dégâts d'éboulis) sont intégrées dans la recherche des causes du dépérissement des sapins en méditerranée.

## Conclusion

Les causes du dépérissement du sapin sur le Mont Ventoux sont loin d'être identifiées de façon catégorique. En effet, ce phénomène tend à s'amplifier et semble suivre l'accélération des changements climatiques. Dans cette étude, aucune variable n'explique plus de 50 % de dépérissement. Il semblerait qu'intervienne à échelle locale un ensemble de facteurs biotiques (compétition, ravageurs...) et abiotiques (topographie, microclimat...). Cependant, un manque s'est ressenti sur la caractérisation morphogéologique du sous-sol pendant cette étude. La détermination de la profondeur exacte de la roche mère et son état de fissuration sont une des pistes à suivre pour tenter d'évaluer les risques de dépérissement. Prochainement une campagne de mesure à l'aide d'un résistivimètre (collaboration avec l'UMR Climat, Sol et Environnement du Centre INRA d'Avignon) sera menée pour tenter de les apprécier. La difficulté d'appréhender les causes et les risques de dépérissement au niveau intra comme interplacette, nous incite à étudier ce phénomène sur une plus grande échelle (régionale) pour repérer des facteurs plus larges, applicables sur de grandes surfaces. Il est en tous cas important d'identifier rapidement les causes du dépérissement afin de modéliser ce phénomène et d'identifier les zones et les conditions où il risque de se produire à court comme à moyen terme.

Pour finir, quelques pistes de gestion peuvent être proposées, comme la coupe des arbres infectés par des ravageurs afin d'en limiter la propagation. Mais l'ouverture du couvert peut aussi augmenter la sécheresse de l'air et du sol, néfaste au sapin. Le maintien d'une densité raisonnable représente une solution pour limiter la compétition hydrique du peuplement et assurer sa vigueur. Une gestion adaptée aux conditions locales devra s'imposer pour la conservation des sapinières méditerranéennes mais non sans contraintes.

## **Références bibliographiques :**

Badeau V., Dupouey J-L., Cluzeau C., Drapier J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Forêt-Entreprise*, 162, 25-62

Becker M., 1987. Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique et dendroécologique. *Ann. Sci. For.* 44, 379-402.

Becker M. et Lévy G., 1988. A propos du dépérissement des forêts: climat, sylviculture et vitalité de la sapinière. *Revue Forestière Française* XL 5. 344-358.

Bert G.D., 1992. Influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance et l'état sanitaire du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. Etude phytoécologique et dendroécologique. Doctorat de l'Université de Nancy 1 en Sciences du Bois, Biologie Végétale et Forestière, 0-110.

Bigler C., Gricar J., Bugmann H., Cufar K., 2004. Growth patterns as indicators of impending tree death in silver fir. *Forest Ecology and Management* 199, 183-190.

Cramer H.H, 1984. On the predisposition to disorders of the Middle European forest. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer* 37, 97-20.

Guicherd, P. (1984) Water relations of European silver fir (*Abies alba* Mill.) in 2 natural stands in the French Alps subject to contrasting climatic conditions. *Annals of Forest Science*, 51 (6), 599-611.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Fourth Assessment Report, *WMO UNEP*, 18.

Ladier J., 2004. Les stations forestières des Préalpes sèches : définition, répartition, dynamique, fertilité. Office National des Forêts- Direction territoriale Méditerranée, 124.

Lebourgeois F., Granier A. et Bréda N., 2001. Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997 : Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. *Ann. For. Sci.* 58 (2001) 733–754

Lévy G. et Becker M., 1987. Le dépérissement du sapin dans les Vosges : rôle primordial de déficits d'alimentation en eau. *Ann. Sci. For.* 44, 403-416

Maugard F., Pontois V., Alger E., Bertrand P., Aumonier T., 2006. Analyse descriptive de l'état sanitaire de la sapinière pyrénéenne, en France. Compte rendu du projet SYLVAPYR du programme INTERREG III France/Espagne 2000-2006, 1-3.

Pauly H., 2006. Résultats canicule 2005 du réseau complémentaire canicule. Département de la santé des forêts, 9

Potočić, N., Ćosić, T. & Pilaš, N., 2005. The influence of climate and soil properties on calcium and vitality of silver fir (*Abies alba* Mill.) *Environmental Pollution*, 137, 596-602.

Thomas A-L., Gegout J-C., Landmann G., Dambrine E., King D., 2002. Relation between ecological conditions and fir decline in a sandstone region of the Vosges mountains (northeastern France). *Ann. Sci. For.* 59, 265-273.

Comité scientifique sous la direction de du Merle P., 1978. La Terre et la Vie : revue d'écologie appliquée, *Société Nationale de Protection de la Nature et d'Acclimatation de France*, 7-66.

## **Résumé :**

La présente étude s'inscrit dans un projet national de recherche sur « *La Vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques : de l'arbre aux aires bioclimatiques* ». Plus précisément, elle concerne le dépérissement des sapinières (*Abies alba* Mill.) de l'arrière pays méditerranéen sur le Mont Ventoux. Ce travail préliminaire au projet vise à trouver les causes impliquées ou repérer des pistes expliquant le dépérissement du sapin à une échelle locale (Versant Nord). Cette étude s'est déclinée en trois étapes : 1/ Elaboration du protocole d'étude dendrométrique et phytosanitaire du peuplement forestier et de ces conditions stationnelles. 2/ Mise en place d'un transect en courbe de niveau et collecte des données. 3/ Analyse graphique et statistiques des données. Les résultats montrent que le dépérissement est causé par une multitude de facteurs tels que la distance à la combe, la profondeur du sol ou encore une compétition accrue entre individus. Le dépérissement sur le transect n'est pas distribué de façon homogène. L'occurrence du dépérissement sur des zones à priori de bonnes conditions stationnelles et structurales implique un élargissement et une amélioration des méthodes d'étude du milieu. Dans un futur proche, l'étude du dépérissement à plus grande échelle (régionale) servira à établir un modèle applicable sur de grandes surfaces. Ainsi, la graduation des zones à risques aidera les gestionnaires à limiter l'impact des changements climatiques par une gestion adaptée des sapinières méditerranéennes.