



Mémoire de stage

présenté par

Sabrina RACHEDI

Pour obtenir le diplôme de

Master National mention

«Agronomie - Agriculture - Agroalimentaire»

**Spécialité : « Gestion Environnementale des
Ecosystèmes et des Forêts Tropicales »**

Sujet :

**Contribution à l'étude des mécanismes écologiques
impliqués dans le dépérissement du Sapin pectiné (*Abies
alba*. Miller) et caractérisation sanitaire au Mont-Ventoux**

Soutenu publiquement le 19 Septembre 2008

à AgroParisTech-Ecole Nationale du Génie Rural
et Ecosystème Forestier (ENGREF)
Centre de Montpellier

devant le jury suivant :

Dr. Hendrik DAVI	Maître de stage
Dr. Laurent MISSON	Examineur
Dr. Raphaël MANLAY	Tuteur ENGREF

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier toute l'équipe de l'Unité de Recherche « Écologie des Forêts Méditerranéennes » (URFM, INRA Avignon) pour leur accueil durant toute la période de mon stage, notamment, dans l'équipe EFDC, Florence COURDIER, Nicolas MARIOTTE, William BRUNETTO, Maxime CAILLERET, ainsi qu'Annabelle AMM et Marianne BEN HARIRA, pour leur aide, et pour les agréables sorties sur le terrain, très enrichissantes. Pour leur disponibilité et surtout l'ambiance d'équipe inoubliable.

Mes vives remerciements vont à Hendrik DAVI qui a accepté de diriger mon stage, pour son encadrement, ses orientations, ses discussions très instructives et enrichissantes, à Philippe DREYFUS pour ses corrections et remarques pertinentes lors de la rédaction de ce présent rapport.

Je tiens à remercier particulièrement Maxime CAILLERET, pour sa patience et sa disponibilité à chaque fois que je l'ai sollicité, malgré son emploi du temps chargé, pour ses remarques et commentaires pertinentes durant toute la période de mon stage et la rédaction de mon rapport de stage.

Merci à l'équipe d'EMMAH, André CHANZY, Marie NOURTIER, Yingge XIE, de m'avoir associée à eux et pour les bons moments partagés sur le transect en courbe de niveau au Mont-Ventoux. Ce fut un plaisir de travailler avec eux, en particulier Yingge XIE, avec lequel j'ai passé beaucoup de temps.

Je tiens à remercier lyade SARAY EDDINE, pour son assistance au laboratoire du sol.

Un grand merci à l'ensemble du personnel de l'unité URFM sans exception (Chercheurs, techniciens et Agents Administratifs), avec lesquelles j'ai échangé des idées, et des moments aux pauses café et déjeuners.

Je remercie Raphaël MANLAY qui a accepté de suivre mon projet et qui m'a mise en contact avec le Centre INRA d'Avignon, et ses encouragements lors des moments difficiles.

Merci à toute l'équipe du groupe de Formation et de Recherche « Gestion Environnementale des Ecosystèmes et Forêts Tropicales » (GEEFT), enseignants, assistants, secrétaires, de l'école AgroParisTech-ENGREF de Montpellier qui m'a accueillie pour cette formation.

En fin, je remercie tous mes proches qui m'ont soutenu moralement de loin et de près durant toute l'année.

RESUME

Cette étude concerne le dépérissement des sapinières (*Abies alba* Miller) dans l'arrière-pays méditerranéen. Elle contribue à la détermination des causes du dépérissement du Sapin pectiné au Mont-Ventoux, sur un transect en courbe de niveau en exposition nord. Deux axes sont étudiés : 1/La caractérisation sanitaire. 2/ La caractérisation du sol - profondeur et charge en éléments grossiers (fosses pédologique), résistivité électrique et teneur en eau (tomographie par l'unité EMMAH, INRA Avignon) -, complétée par la description de la structure du peuplement et de la compétition. Les analyses par corrélation montrent que le facteur prépondérant expliquant défoliation et mortalité des sapins, est la structure du peuplement. De manière *a priori* paradoxale, la défoliation est plus faible lorsque la résistivité de surface (0 à 1 m) est forte (conditions hydriques défavorables) : les arbres situés sur ces sols sont probablement déjà acclimatés. De plus, les dominants sont probablement capables de capter l'eau en profondeur ; défoliation faible et résistivité favorable en profondeur (5 à 20 m) sont corrélées. L'étude fonctionnelle à l'échelle de l'arbre est à envisager pour approfondir la compréhension de ces dépérissements. En matière de gestion, nos résultats incitent à préconiser une sylviculture à densités modérées, susceptible de limiter le manque d'eau, notamment pour les arbres de dimensions intermédiaires, apparus dans cette étude comme étant les plus vulnérables.

ABSTRACT

The study falls within the national project Dryade ("The vulnerability of forests to climate change: tree to climate areas"). It concerns the decline of silver fir (*Abies alba* Miller.) in the Mediterranean hinterland. This contribution aims to find the causes of this decline in the Mont Ventoux, on a transect in contour line (plots at same elevation, 1100 m asl, but different soil characteristics). Two axes were studied. First, the health characterization of fir was made on the basis of the DSF protocol adapted by URFM, INRA Avignon. Secondly, a soil characterization (soil depth and coarse elements rate) with estimate of moisture content by measuring the electrical resistivity of the soil through tomography (EMMAH, INRA Avignon) was made and was supplemented by description of the stand structure and competition between trees. The results of the correlations analysis show that the most predominant factor explaining defoliation and mortality of trees is the stand structure. Contrary to our expectation, defoliation is lower when the first soil meter has a high resistivity (lot of coarse elements, low water content): the low vulnerability of the trees located there is probably due to an acclimatization to these soils; also, the dominant individuals are probably able to catch deep water (low resistivity between 5 and 20 m). A functional study at tree-level should be carried out to better understand this fir decline. According to our results, foresters should manage the stand at moderate density levels in order to reduce the risk of drought damages, especially for mid-size trees.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
ABSTRACT	2
TABLE DES MATIERES	3
1. INTRODUCTION	5
2. MATERIEL ET METHODES.....	7
2.1. Site d'étude :	7
2.1.1. Localisation :	7
2.1.2 Climat :	8
2.1.3. Caractéristiques stationnelles du transect :	8
2.4. Méthodes d'analyse des données	12
3. RESULTATS	15
3.1 Analyse brute des données sanitaires	15
3.2 Effet des caractéristiques individuelles (Analyse « arbre »)	17
3.3 Effet des caractéristiques stationnelles (Analyse « placette »)	19
4. DISCUSSION.....	26
5. CONCLUSION	28
6. REFERENCES	29
7. LISTE DES ABREVIATIONS	32

8.	LISTE DES TABLEAUX	33
9.	LISTE DES FIGURES	33
10.	ANNEXES	35

1. INTRODUCTION

Dans le contexte du changement climatique, les experts de l'IPCC (2007) prédisent d'ici 2100, dans le sud de l'Europe, une augmentation des températures estivales de 2,2 à 5,1°C et une diminution des précipitations annuelles de 4 à 27% avec un déficit marqué en été. De 1956 à 1997, Lebourgeois (2001) ont déjà trouvé sur 68 stations françaises, une augmentation de 1,2° C de la température moyenne annuelle. A Carpentras cette augmentation atteint 1,6° C depuis 1964 et est plus prononcée en été (Cailleret, 2007). Ces changements climatiques ont sans aucun doute des conséquences sur le fonctionnement et la dynamique des peuplements forestiers.

De nombreuses recherches ont ainsi estimé les conséquences des changements globaux sur la productivité (Duchesneau, 2006, Legay, 2007, Mortier, 1995), mais peu d'études ont analysé leurs effets sur la mortalité (et le dépérissement) alors qu'il s'agit d'un processus majeur de la dynamique forestière.

Le dépérissement et l'état sanitaire des arbres constituent des thèmes qui, depuis quelques décennies, préoccupent de plus en plus les chercheurs et les responsables forestiers dans un nombre croissant de pays, tant européens, nord-américains que d'Afrique du Nord. De nombreuses études ont déjà été menées sur cette thématique (Abdenbi, 2003, Becker, 1987, Certini, 2000, Lazarus, 2004, Legrand, 1993, Torrelli, 1999). Devant la multitude des hypothèses avancées, il est de plus en plus évident que le dépérissement est causé par un « complexe de causes », dont la nature précise pourrait varier selon les régions, les épisodes climatiques, et les espèces concernées. Les causes les plus fréquemment évoquées sont les événements climatiques intenses et/ou de longue durée, la pollution atmosphérique, sous des formes diverses y compris à travers ses conséquences sur les propriétés de sols, les maladies, et une gestion sylvicole inadaptée (Lévy, 1987).

Le présent travail s'inscrit dans un projet national sur quatre années (2007-2010) nommé « Dryade : vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques : de l'arbre aux aires bioclimatiques » financé par l'Agence Nationale de la Recherche. L'Unité de Recherches « Écologie des Forêts Méditerranéennes » (URFM) de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Centre d'Avignon, est en charge d'un volet portant sur le Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans l'arrière-pays méditerranéen. Le dépérissement de cette espèce de grande importance économique et écologique, est régulièrement observé (Fourrier, 2007), mais les causes du déclin restent encore mal connues.

Les sapinières étudiées subissent à la fois des influences montagnardes et méditerranéennes, vu la situation géographique du Mont-Ventoux. Dans ces « sapinières sèches », l'impact du changement climatique est d'autant plus fort que cette espèce sensible à la sécheresse est proche de la limite sud de son aire de répartition française. On constate d'ailleurs, depuis 2003, une accentuation du dépérissement (Unité de recherche forestière méditerranéenne, 2007).

Sur le site étudié, le Sapin est en dynamique de recolonisation (de même que le hêtre-*Fagus sylvatica* L.) sous couvert de Pins (noir, sylvestre, à crochet) plantés à la fin du 19ème siècle et la première moitié du 20ème siècle dans le cadre du programme de « Restauration des Terrains de Montagne ». Ce phénomène est appelé « maturation sylvigénétique » (AMM, 2006, Dreyfus, 2004).

Or, la progression du Sapin pourrait être remise en cause par la perte massive d'arbres semenciers, engendrant une baisse de la production de graines et de la régénération.

Qu'advierait-il des sapinières si les peuplements qui subsistent depuis un siècle et plus, et qui sont les principales sources de graines, dépérissent ?

Cette étude est une contribution à l'analyse des mécanismes écologiques impliqués dans le dépérissement du Sapin pectiné et de la caractérisation de l'état sanitaire. Dans le complexe de causes entraînant le dépérissement d'un peuplement forestier, trois types de facteurs interagissent (Abdenbi, 2003, Mattson, 1987):

- Les facteurs prédisposants : ces facteurs diminuent la vigueur de l'arbre et les rendent moins résistants aux différentes formes de perturbations. Il peut s'agir de conditions stationnelles défavorables (e.g. faible réserve hydrique du sol, station peu fertile, altitude trop basse ou trop haute), d'une gestion sylvicole inadaptée (maintien du peuplement à un niveau de concurrence très élevé), d'une provenance inadaptée (pour une plantation, mais ce n'est pas le cas du Sapin dans la région) ou plus généralement d'une mauvaise qualité génétique (inadaptation aux conditions stationnelles), de conséquences à long terme d'événements climatiques passés, (e.g. sécheresse de 1976), de parasites (e.g. Gui, insectes défoliateurs), de la pollution atmosphérique.
- Les facteurs déclenchants : ces facteurs impliquent des changements physiologiques et morphologiques entraînant le dépérissement, ou la mortalité directe des arbres prédisposés. Il s'agit le plus souvent d'un stress hydrique long et/ou très intense ou de parasites (e.g. scolytes) lorsque leur population est importante.
- Les facteurs aggravants : ces facteurs agissent sur les arbres affaiblis, les empêchant de retrouver leur vitalité initiale (résilience) et précipitant ainsi leur mort. Un stress hydrique prolongé dû à plusieurs années de sécheresse qui suivent l'événement déclenchant peut aggraver l'état sanitaire de l'arbre tout comme les parasites (e.g. scolytes, champignons).

Cette étude est réalisée sur seize placettes, situées sur un transect le long d'une courbe de niveau en exposition nord, sur le Mont-Ventoux. Elle a pour but d'établir une relation entre le niveau de dépérissement et les caractéristiques biotiques et abiotiques de ces placettes, homogènes sur le plan mésoclimatique.

La question de recherche peut être formulée de la manière suivante : en tant que facteurs prédisposants, quelles sont les influences respectives du sol et de la structuration du peuplement sur l'état sanitaire et le dépérissement des sapinières du Mont-Ventoux ?

Nous étudions les effets de la structure du peuplement et du sol. Ce stage a été divisé en deux parties :

- 1- La caractérisation sanitaire du Sapin pectiné en se basant sur le protocole mis en place par le Département « Santé des Forêts » (DSF) et adapté par l'URFM.
- 2- La caractérisation stationnelle du sol : la teneur en eau du sol, la charge en éléments grossiers, et la profondeur du sol d'une part à partir de mesures de résistivité électrique et d'autre part par l'ouverture de fosses pédologiques. Ceci a été complété par l'analyse de la structuration du peuplement et de la compétition entre les sapins dans chaque placette.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site d'étude :

2.1.1. Localisation :

Le massif du Ventoux (44°.11' Nord et 5°.14' Est), est un anticlinal orienté Est-Ouest situé à l'Ouest des Pré-Alpes sèches (Ladier, 2004), culminant à 1909 m (Montenat, 2004). La zone d'étude est située sur le versant septentrional, très abrupt. Nous étudions un transect allant depuis une crête jusqu'à la combe du Mont-Serein, sur une longueur de plus de 800 m (Figure 1). Le transect est homogène du point de vue bioclimatique avec une exposition Nord et une altitude comprise entre 1100 m et 1150 m. Le peuplement est une hêtraie-sapinière dite « chaude » de l'étage montagnard inférieur d'Uzac (Ladier, 2004), caractérisée par des zones saines et dépérissantes relativement proches.

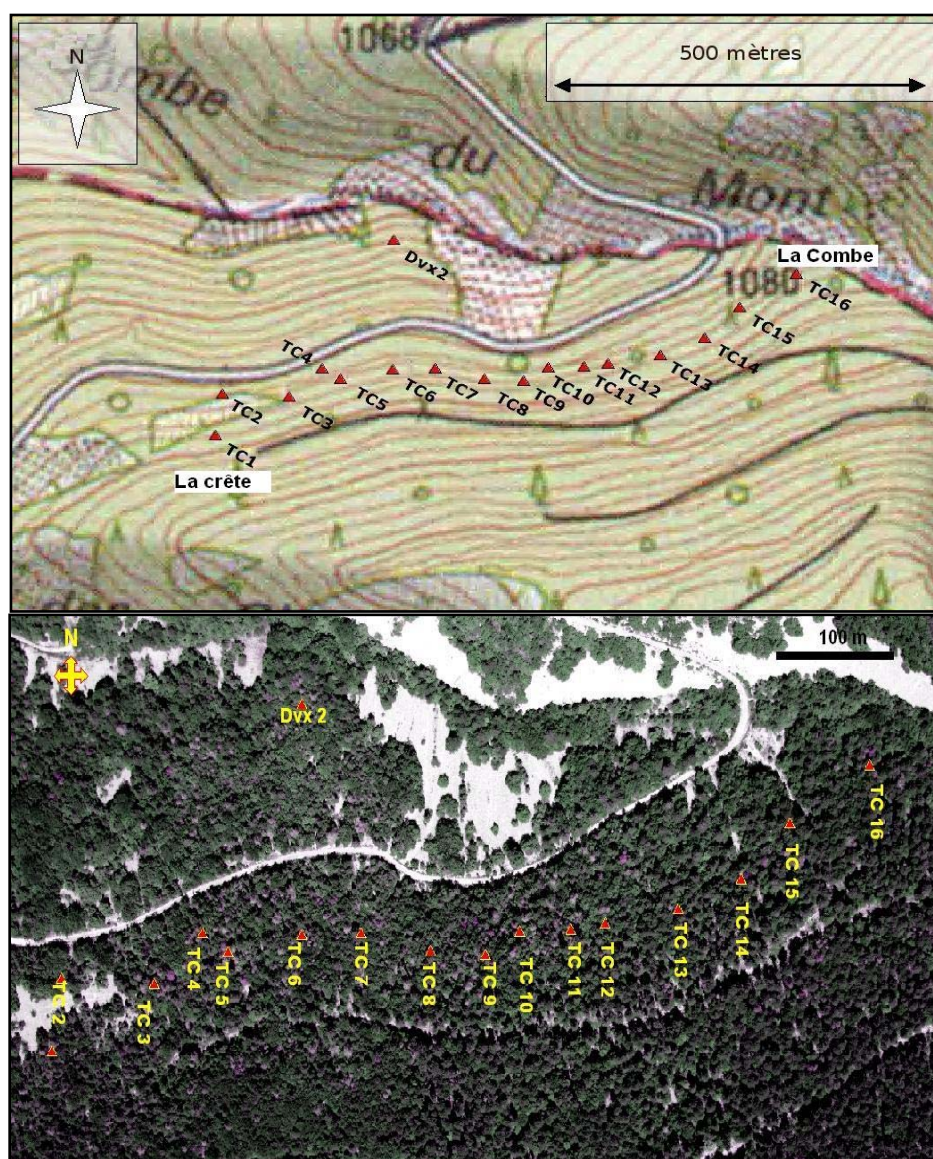


Fig.1. Carte de localisation des parcelles étudiées (versant Nord du Mont-Ventoux)

2.1.2 Climat :

La station du Mont-Serein (1445 m d'altitude, versant Nord) reçoit 1270 mm de pluie en moyenne annuelle, d'une répartition irrégulière ; le régime saisonnier est du type APHE, pluies essentiellement automnales (Cailleret, 2007), et sécheresse estivale caractéristique du climat méditerranéen. La température moyenne annuelle est de 6,6 °C (Ladier, 2004).

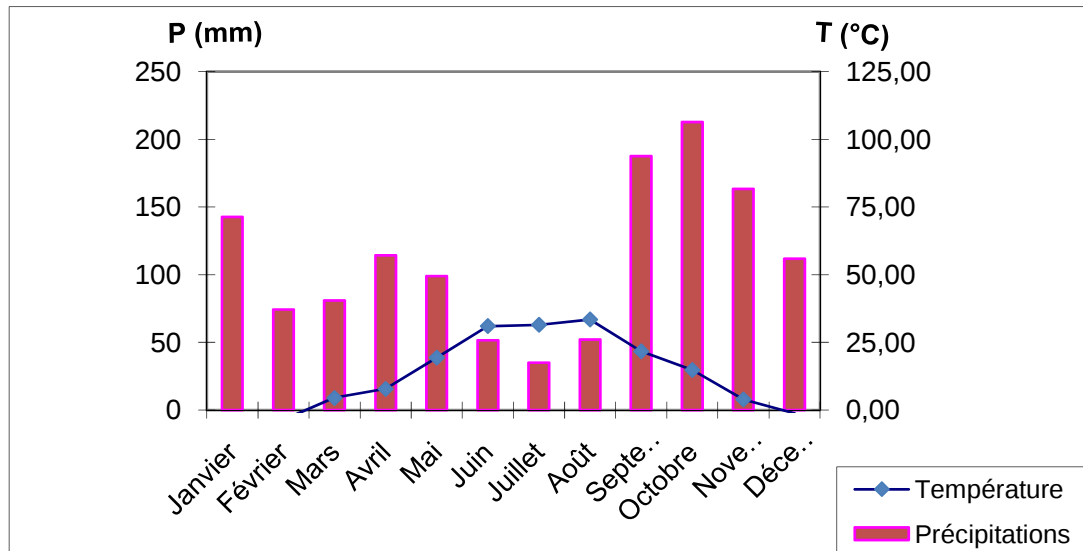


Fig.2. Diagramme ombrothermique issu des données de la station météo du Mont-Serein (1994 - 2007)

2.1.3. Caractéristiques stationnelles du transect :

Le substratum géologique de la zone étudiée est constitué de calcaire dur et compact, parcouru de failles. Suite à la dégradation engendrée par la surexploitation pastorale et forestière au cours du 19^{ème} siècle, les sols sont peu évolués, de type lithosols, rendzines ou, très localement, rendzines brunifiés. Suite à l'action de l'eau et du gel, des champs d'éboulis se sont créés, les éléments se désagrégeant de plus en plus finement. Sur les sols superficiels, la terre fine est limoneuse et humifère, de couleur noire, pour les substrats plus profonds, la texture est limono-argileuse voire argilo-limoneuse pour les plus évolués (Fourrier, 2007)

La pente est en moyenne de 40% ; plusieurs combes parcourent le secteur, d'où présence de microclimat variés. L'orientation des placettes varie très peu, entre 360 et 400 grades (NNW - N) (cf. Annexe 1).

2.2. Espèce étudiée :

Le Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) est la troisième espèce résineuse en volume exploité en France et représente un peu moins de 20% de la production totale, dont 82 millions de m³ sont gérés en forêt publique et 74 millions de m³ en forêt privée (cf. site Dryade, <http://www.inra.fr/dryade/>).

En surface, le Sapin pectiné constitue la quatrième essence résineuse avec près de 500 000 ha.

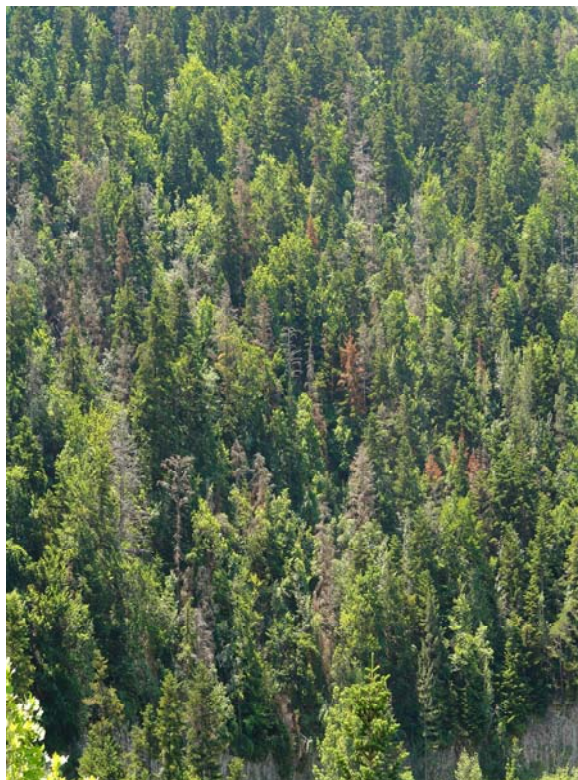


Fig.3. Peuplement de Sapin pectiné (*Abies alba* Miller)

C'est une espèce qui exige une forte humidité relative de l'air ; elle tolère moins les sécheresses estivales que le hêtre avec qui elle est généralement associée mais est moins vulnérable aux gelées tardives et ne supporte pas les sols hydromorphes (Cailleret, 2007)

C'est une espèce en fin de succession végétale (dite « dryade »), qui tolère l'ombre. Elle s'installe donc dans les milieux en voie de fermeture. La germination est possible avec 1% de la lumière du jour. Le Sapin peut survivre en phase de jeunesse avec seulement 5%. Le système racinaire est profond, le pivot peut atteindre 1,6 m de profondeur, même sur des sols humides et lourds (Schwitter, 2000)

2.3. Acquisition des données:

En 2007, cinq placettes le long d'un gradient altitudinal (Dvx1 à Dvx5), non utilisées pour Cette étude (hormis pour évaluer certaines caractéristiques pédologiques considérées comme homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude), et seize placettes le long d'une courbe de niveau (TC1 à TC16) (Fig.1) ont été mises en place sur la face nord du Ventoux. Ces placettes ont chacune une surface horizontale de forme carrée de 400 m². Les

placettes en courbe de niveau se situent d'abord sur une crête (TC1 à TC8), puis dans une combe (TC9 à TC16).

Les données des Inventaires effectués en 2007, sur chaque parcelle de 400 m² avec mesure de la circonférence des arbres dont le diamètre dépasse 10 cm (au niveau de mesure conventionnel : 1,30 m du sol, côté amont) et dénombrement des autres avec séparation entre arbres secs et arbres non secs ont été exploités pour l'étude de la relation structure du peuplement et le taux d'arbres secs.

2.3.1 Caractérisation pédologique :

Pour calculer la réserve utile en eau du sol de chaque placette, de chaque placette, il est nécessaire de connaître la courbe de rétention en eau du sol, sa profondeur, sa densité apparente (La densité du sol sec concernant l'ensemble des fractions solide et des pores), et le taux d'éléments grossiers. La courbe de rétention en eau du sol a été obtenue sur des échantillons de sol prélevés au niveau de la placette intensive Dvx2 située à proximité du transect (Fig. 1). La méthode utilisée est celle de la presse à membrane de Richards (1941)(cf. protocole de la courbe de rétention en eau du sol en annexe 2). Les pressions utilisées sont 0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 4 ; 8 ; 12 et 15 bars. À partir de la pression 0,1 bar, on détermine la teneur en eau du sol à la capacité au champ (pF = 2¹). La dernière pression appliquée (15 bars) correspond au point de flétrissement permanent (pF = 4,2).

Sur le transect en courbe de niveau, la profondeur moyenne du sol a été déterminée pour chaque placette (lors de leur installation en 2007), à partir de quatre sondages à la barre à mine et de l'ouverture d'une fosse. Le pourcentage d'éléments grossiers a été déterminé à partir d'analyses photographiques des fosses pédologiques (voir un exemple en Annexe 3).

La réserve utile est alors calculée par la formule suivante (Quentin, 2001) :

$$RU = (H_{cc} - H_{pF}) / 100 \cdot Da \cdot EP \cdot (100 - EG)$$

avec :

- **RU** : Réserve Utile du sol (mm)
- **Da** : Densité apparente du sol (g.cm⁻³). Estimée à 1 g.cm⁻³ (Duchaufour, 1997). Ce paramètre n'a pas été mesuré sur le terrain compte tenu du fort taux d'éléments grossiers du sol.
- **Hcc** : Humidité massique. La quantité d'eau maximum retenue dans le sol est mesurée par la différence de poids des échantillons avant et après séchage en étuve à 105 °C à la capacité au champ (pF 2) calculée sur la placette Dvx2 (g.cm⁻³)
- **HpF** : Humidité massique au point de flétrissement permanent (pF 4,2) calculée sur la placette Dvx2 (g.cm⁻³)
- **EP** : Epaisseur du sol mesurée à la barre à mine (mm) (moyenne de 4 sondages à la barre à mine et de la profondeur de la fosse)
- **EG** : Pourcentage volumique d'éléments grossiers supérieurs à 2 mm estimé à partir de l'analyse des photographies des fosses pédologiques.

¹ La tension de succion du sol peut être exprimée en unités de pression ou en hauteur d'eau. Les pédologues emploient une notion particulière, le pF, qui est le logarithme de l'opposé de la pression négative P exprimée en cm d'eau.

Afin de compléter la caractérisation pédologique, des mesures de résistivité électrique du sol ont été réalisées en collaboration avec L'Unité Méditerranéenne de la Recherche Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydro systèmes (INRA Avignon), pour cela, dix profils tomographiques en ligne continue le long du transect en courbe de niveau, sur une longueur de 700 m, allant de la placette TC 3 à la TC 16. Les placettes TC 1, 2 et 4 ont été exclues car elles ne sont pas sur la ligne continue du transect, elles se trouvent soit trop au-dessus (TC1), soit trop en dessous de la ligne (TC 2 et 4). (cf. Annexe 4)

La mesure de la résistivité électrique du sol est une technique géoélectrique non destructive utilisée pour caractériser les propriétés du sol, basée sur la réponse des matériaux du sol au flux des charges électriques (Amato, 2008).

Cette technique mesure la capacité d'un corps à limiter le transfert d'un courant électrique (en $\Omega.m$). Elle est fortement liée à la texture, à la granulométrie et à l'humidité du sol.

La méthode employée consiste à appliquer un courant électrique à travers des électrodes conductrices et à mesurer la différence de potentiel électrique (tension) entre deux électrodes. Chaque mesure de résistivité en un point nécessite quatre électrodes (quadripôle), deux pour l'injection du courant électrique et deux pour la mesure de différence de tension (Amato, 2008). La résistivité électrique du sol est ensuite calculée à partir des contributions volumiques de tous les points traversés par le courant en fonction de la distance à la source (Chouteau, 2003). Les valeurs des croisements des différences de potentiels donnent une section à 2 dimensions, tenant compte de la surface parcourue par le courant électrique et de la profondeur prospectée. La profondeur prospectée par le courant émis dépend de la distance d'écartement entre les électrodes. Plus cette distance est grande, plus la profondeur prospectée est importante au détriment de la précision de la mesure (pixel plus large). Sur ce dispositif, l'Unité EMMAH a installé 64 électrodes espacées de 2 m le long d'une ligne continue. La longueur du profil est donc de 128 m ce qui correspond à une profondeur de prospection de 25 m. Pour couvrir l'ensemble du transect en courbe de niveau, 10 profils tomographiques ont été réalisés couvrant ainsi une longueur de 700 m.

Les valeurs mesurées sur le terrain par le tomographe sont ensuite traitées par le logiciel RES2 DM, qui permet d'obtenir les valeurs de la résistivité électrique sous forme d'une carte en deux dimensions. On a ainsi pu différencier les zones à forte résistivité (fort taux d'éléments grossiers, dalles rocheuses, faible teneur en eau) des zones à faible résistivité (peu d'éléments grossiers, forte teneur en eau).



Photo n° 1: Résistivimètre



Photo n° 2: Profil du résistivimètre

2.3.2. Caractérisation sanitaire :

Cette caractérisation a pour objectif d'évaluer la santé des arbres et de la suivre au cours du temps. Pour ce faire, les observations portent à la fois sur des symptômes jugés anormaux par rapport à un arbre estimé en bonne santé (coloration anormale, mortalité de branches, défoliation des branches, nombre de cônes produits...) et sur la présence de causes de dommages (parasites) susceptibles d'altérer la santé de l'arbre.

227 arbres échantillons ont été observés en juillet 2008 à l'aide de jumelles depuis plusieurs points d'observation (au minimum deux pour chaque arbre), si possible en vision horizontale du houppier depuis l'amont (chaque placette étant en pente). Ces observations avaient déjà été réalisées en Août 2007 sur une partie de ces arbres. Une comparaison entre les deux dates a donc pu être effectuée afin de nous permettre un suivi temporel du dépérissement sur le transect en courbe de niveau.

- Démarche d'observation :

Le principe général d'observation est de noter uniquement ce qu'on voit. La démarche consiste en quatre opérations (cf. Protocole de caractérisation sanitaire en annexe 5) :

- 1- Evaluation de la coloration anormale en % de feuillage chlorosé par rapport au feuillage vert.
- 2- Evaluation de la mortalité des branches en % de branches mortes par rapport aux vivantes.
- 3- Notation du déficit foliaire par rapport à un arbre de référence.
- 4- Observation de causes de dommages liés à des symptômes autres que la mortalité de branches et la coloration anormale ; présence du gui, notamment.

2.4. Méthodes d'analyse des données

Trois types de données ont été utilisés :

1. Estimations d'état sanitaire, d'âge (par lecture de carottes prélevées à 1,30 m du sol) des arbres dominants ou co-dominants au sein des placettes ou à leur périphérie, et mesure de leur hauteur et de leur circonférence (données 2007-2008).
2. Caractéristiques stationnelles (sol, topographie), et voir lesquelles sont liées aux dépérissements importants observés sur le transect en courbe de niveau (données 2007-2008).

2.4.1 Analyse brute des données sanitaires :

Nous avons d'abord comparé les données de l'état sanitaire mesuré en 2007 et en 2008 en utilisant le sous-échantillon des arbres suivis en 2008 qui étaient déjà mesurés en 2007.

Nous avons ensuite comparé les différents estimateurs du dépérissement, déterminés pour chaque placette : taux de secs dans les inventaires (1) en nombre d'individus et (2) en surface terrière, (3) taux de défoliation des dominants, (4) taux de coloration anormale, (5) indice global d'état sanitaire.

Pour certaines analyses, les arbres ont été regroupés en classes d'état sanitaire (cf. Annexe 6) :

- 5 classes de note pour le % de coloration anormale (CA) et le % de défoliation (DF): (classe 0: < 5%, classe 1: [6-20], classe 2: [21-35], classe 3: [36-60], classe 4: [61-100]).
- Nous avons attribué une note globale de l'état sanitaire des arbres, cette notation est basée sur deux variables, à la fois le pourcentage de la coloration anormale (CA) et le pourcentage de défoliation des branches du houppier notable (DF). La note est répartie en 5 classes:

0 : Absence de symptôme: CA **et** DF ≤ 10%

1: Arbre peu endommagé: 10% < DF **ou** CA ≤ 25%

2: Arbre moyennement endommagé: 10% < DF **et** CA ≤ 25% ; 25% < DF **ou** CA ≤ 60%

3: Arbre fortement endommagé: 25% < DF **et** CA ≤ 60% ; DF **ou** CA > 60%

4: Arbre mort.

2.4.2 Effet des caractéristiques individuelles sur la défoliation.

Tous les arbres mesurés sur l'ensemble des 16 placettes ont été regroupés ensemble. Nous avons testé l'effet de la hauteur et de la circonférence des arbres, et du degré de compétition sur leur état sanitaire. La significativité des effets a été testée par analyse de variance. Pour ce faire, les arbres ont été regroupés par classe de hauteur, de circonférence et d'indice de compétition :

- 5 classes de hauteur (classe 0 : <11,5 m ; classe 1 : [11,5-13 m[; classe 2 : [13-15 m[; classe 3 : [15-17 m[et classe 4 : ≥17 m).
- 5 classes de circonférence (classe 0: <700 mm ; classe 1 : [700-900 mm[; classe 2 : [900-1100 mm[; classe 3 : [1100-1300 mm[; et classe 4 : ≥1300 mm).
- 4 classes de compétition (classe 0 : $I_c < 15$; classe 1 : [15-25[; classe 2 : [25-31[; classe 3 ≥31

Afin d'analyser les effets compétition et distance à la combe, tous les arbres dominants des 16 placettes ont été localisés sur une carte (cf. Annexe 4). La distance horizontale de chaque arbre au piquet central de la placette a été mesurée sur un plan papier ainsi que les angles par rapport à l'Amont.

L'indice de compétition utilisé est calculé de la façon suivante (Riopel, 2006):

$$I_c(i1) = \sum_{i2:1,n} \left(\frac{D_{i2}}{D_{i1}} \right) \times \arctan \left(\frac{D_{i2}}{\text{Dist}_{i1-i2}} \right), \text{ avec :}$$

I_c : Indice de compétition calculé pour l'individu $i1$

D_{i2} : Diamètre de l'arbre voisin $i2$, dans un rayon maximum de 4 m

D_{i1} : Diamètre de l'arbre étudié ($i1$)

Dist_{i1-i2} : Distance entre les deux arbres (i1 et i2).

L'indice de compétition a été calculé seulement pour les arbres pris dans un rayon de 8 m à partir du centre de chaque placette.

Pour rechercher une éventuelle structuration spatiale du dépérissement, l'effet de la distance à partir du point de départ (point extrême du transect, côté ouest) a aussi été testé.

L'indice de compétition a été aussi calculé pour l'ensemble des arbres inventoriés, pour lesquels on ne dispose toutefois que de la circonférence (pas de hauteur, ni de coordonnées spatiales). Nous avons testé si les arbres secs appartenaient à une classe de circonférence plutôt qu'à une autre. Comme ici tous les arbres sont comptabilisés et pas seulement les dominants, les 5 classes de circonférence utilisées sont différentes :

- 5 classes de circonférence (classe 0: <300 mm (arbres <10 cm de diamètre) ; classe 1 : [300- 700 mm[, classe 2 : [700-1100 mm[; classe 3 : [1100-1500 mm[et classe 4 : ≥1500 mm).

L'exploitation de l'indice de diversité biologique calculé pour l'inventaire complet effectué en 2007, a permis d'estimer l'effet de diversité spécifique sur le % de défoliation. Cet indice a été calculé à partir de la formule de SHANNON :

$$H'_0 = - \sum P_i \log_2 P_i \quad \text{avec } P_i = n_i / N$$

P_i : Représente la probabilité de rencontrer l'espèce i

n_i : Représente le nombre d'individus de l'espèce i ou le nombre d'espèces de la station (ou du stade).

N : Représente l'abondance totale.

2.4.3 Effets stationnels : structure du peuplement et caractéristiques du sol

Ici nous avons étudié, sur les 16 placettes du transect, les corrélations entre les estimateurs du dépérissement (pourcentage de défoliation et de coloration anormale, et le taux de sapins secs) et les caractéristiques stationnelles mesurées.

Pour les 16 placettes (n<30), nous avons appliqué le test de Spearman, pour déterminer les variables significativement corrélée avec la défoliation et le taux d'arbres secs.

Ce test consiste à tester statistiquement la corrélation linéaire entre les différentes variables aléatoires et indépendantes mesurées sur les mêmes individus. Dans notre cas l'hypothèse nulle posée est que la défoliation est liée aux conditions stationnelles (sol) et /ou à la structure du peuplement.

3.RESULTATS

3.1 Analyse brute des données sanitaires

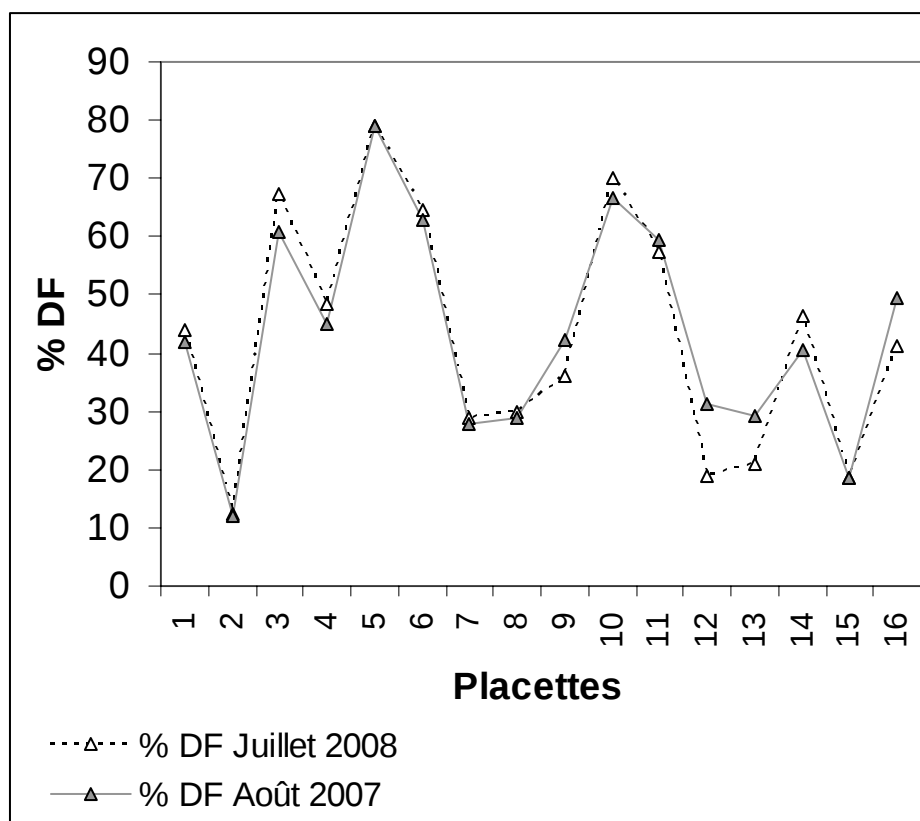


Fig.4. Comparaison des pourcentages de défoliation (DF et DF) 2007-2008

La comparaison des deux courbes (Fig. 4) permet de déduire que les pourcentages de défoliation des deux campagnes, le long du transect en courbe de niveau, sont globalement proches ($r^2=0,93$). Nous retrouvons les mêmes niveaux élevés de défoliation dans les mêmes placettes (TC 1, 3, 5, 10, 14 et 16), et ce malgré des périodes de notations sanitaires légèrement différentes (août en 2007, juillet en 2008, alors que la chute naturelle des aiguilles se déroule en août).

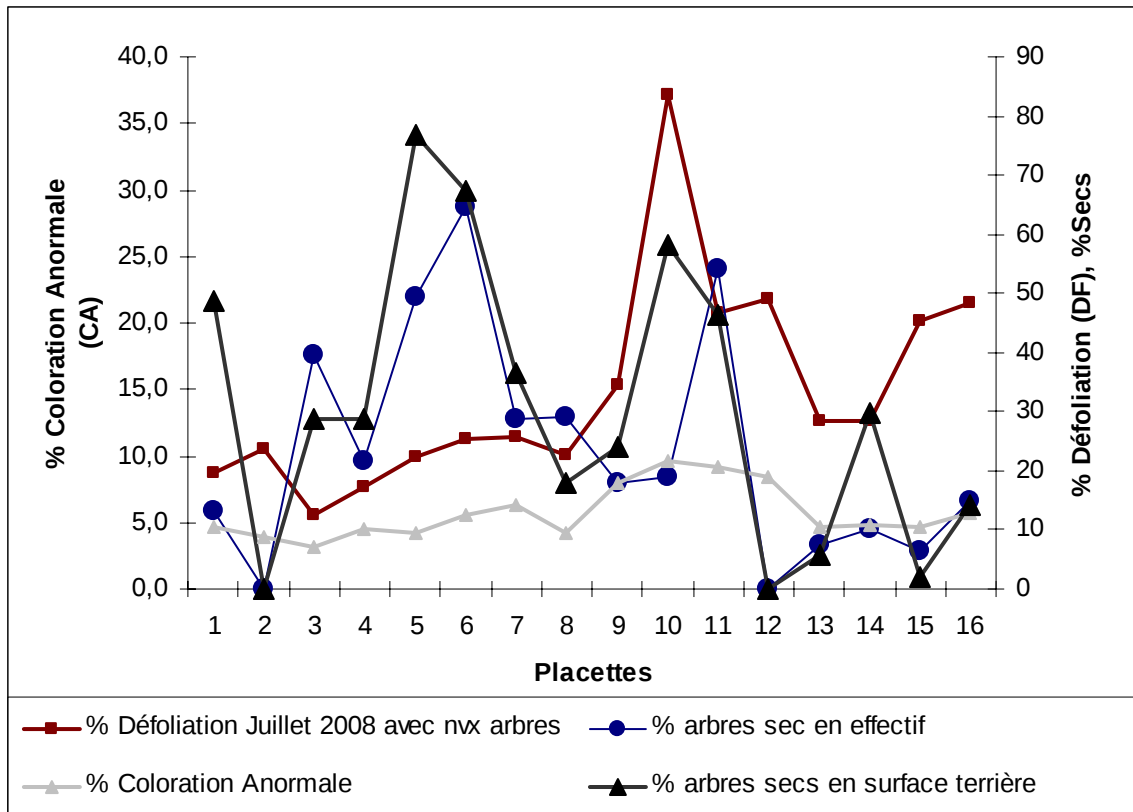


Fig. 5. Comparaison des pourcentages de défoliation, de coloration anormale (CA) et sapins secs (en effectif et en surface terrière).

Le pourcentage de défoliation des dominants et le pourcentage de leur coloration anormale donnent des résultats très proches (Fig. 5), ils varient le long du transect. Ils augmentent en allant de TC1 à TC 16, les taux les plus forts de défoliation et de coloration anormale sont notés dans les placettes (TC 8, TC9, TC10, TC11, TC12 et TC13). Le taux de sapin secs se comporte de manière légèrement différente : il diminue au fur et à mesure que l'on s'approche de la combe, même s'il reste fortement corrélé au pourcentage de défoliation des dominants ($r=0,68$).

3.2 Effet des caractéristiques individuelles (Analyse « arbre »)

Rappel : tous les arbres mesurés sur l'ensemble des 16 placettes sont ici regroupés.

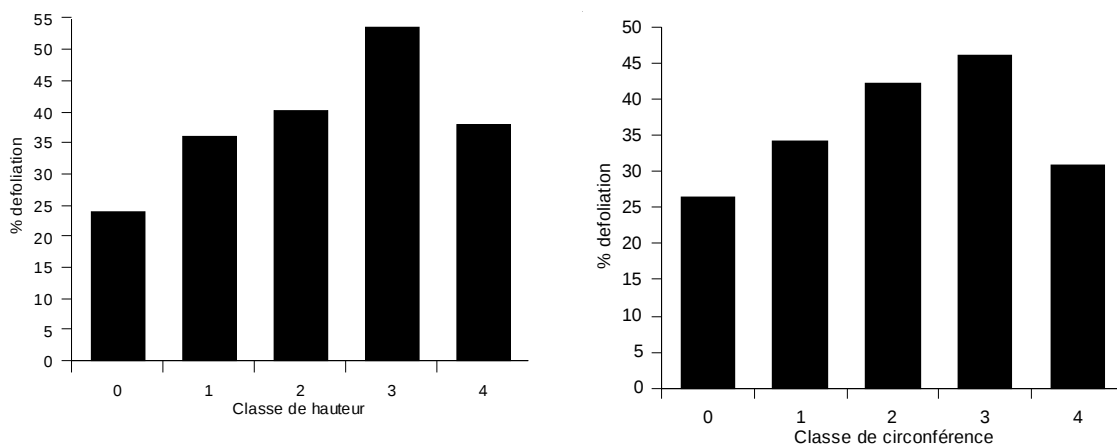


Fig.6. Déficit foliaire des sapins en fonction de la classe de hauteur (à gauche) et de la classe de circonférence (à droite)

Le déficit foliaire est plus important dans les classes intermédiaires de hauteur et de circonférence des sapins (Fig. 6). Une diminution de la défoliation est notée pour les individus de la classe 4. Cet effet est significatif à 10% quand on range les arbres par classe de défoliation, $p=0,07$ et $p=0,04$ (ANOVA) respectivement pour les effets circonférence et hauteur.

Les arbres dominants secs présentent un indice de compétition significativement ($p=0,02$) plus fort (26.1) que les non secs (22.8).

Un résultat assez similaire est trouvé dans les inventaires où ce sont les arbres situés dans les classes de circonférence intermédiaires qui présentent le plus d'arbres secs (Fig. 7).

On note toutefois que les arbres de la classe 700-1100 mm, s'ils correspondent à une dimension intermédiaire (circonférence) sur l'ensemble des 16 placettes, peuvent constituer l'étage dominant dans plusieurs d'entre elles (TC 2 à TC 6, notamment, cf. Fig. 7b)

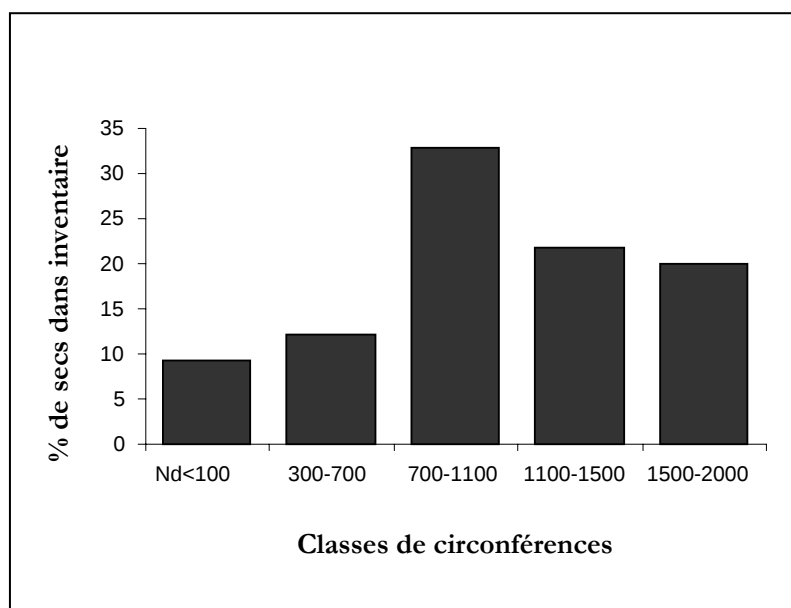


Fig. 7. Répartition des taux de sapins secs par classes de circonférences (mm)

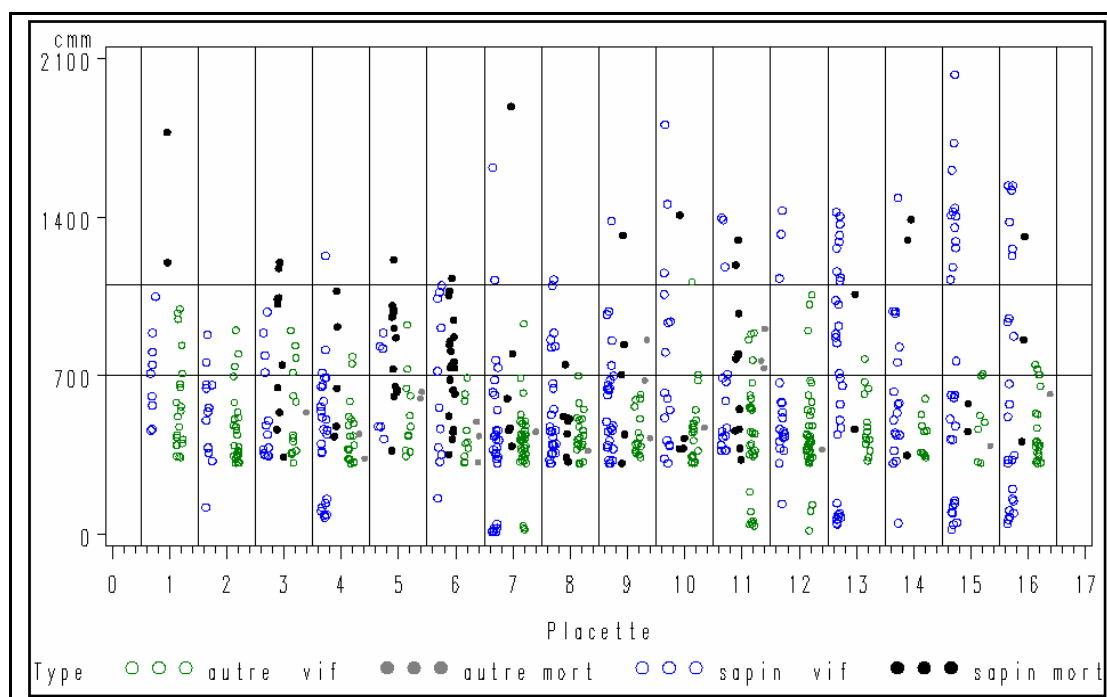


Fig. 8. Inventaire (2007) en circonférence par placette : sapins et autres espèces, en distinguant arbres morts et vivants (sur l'axe vertical sont figurées les limites de la classe 700-1100 mm)

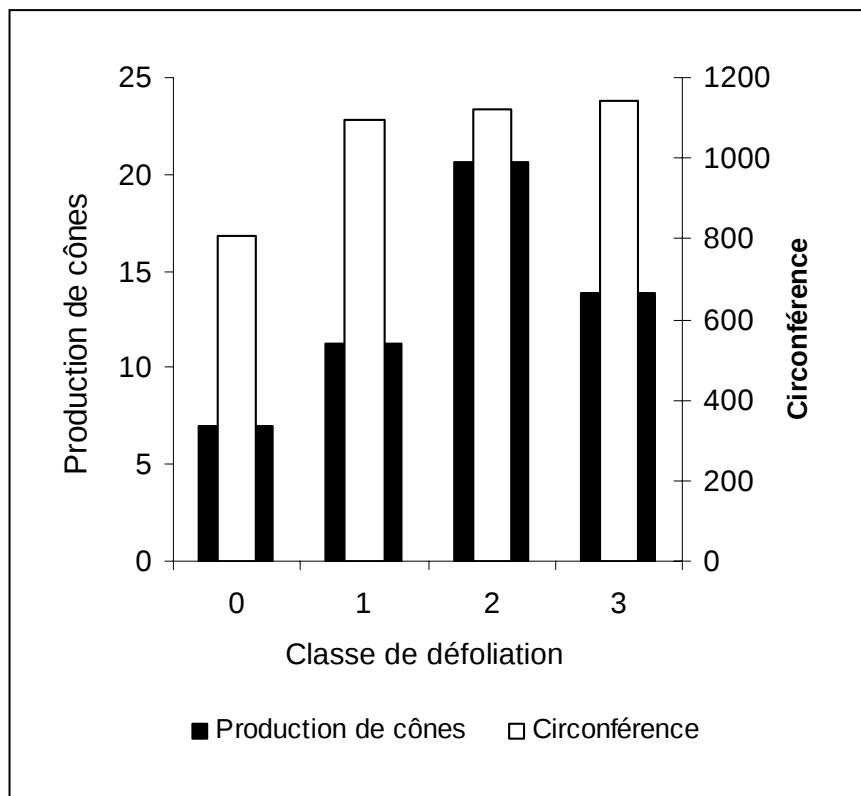


Fig. 9. Lien entre la production de cônes et la défoliation

La production de cônes maximale a lieu pour des défoliations intermédiaires (Fig. 9). Ensuite, la production de cônes chute quand la défoliation devient trop importante.

3.3 Effet des caractéristiques stationnelles (Analyse «placette»)

3.3.1. Teneur en eau du sol mesurée sur une placette intensive Dvx2

La figure 9 montre que l'humidité massique du sol varie entre les différents horizons ; elle est plus importante dans les horizons supérieurs (avant 40 cm), et diminue en profondeur (50-80 cm). Le sol est peu profond dans cette placette ; dès 40 cm de profondeur, on rencontre la dalle rocheuse par endroits. La charge en éléments grossiers dans les horizons prospectés est en moyenne de 60% pour les 3 fosses. L'humidité massique moyenne (des 7 horizons de la fosse pédologique) varie entre 29 et 44% en fonction des pressions exercées (c'est-à-dire en fonction du pF sur la figure 10).

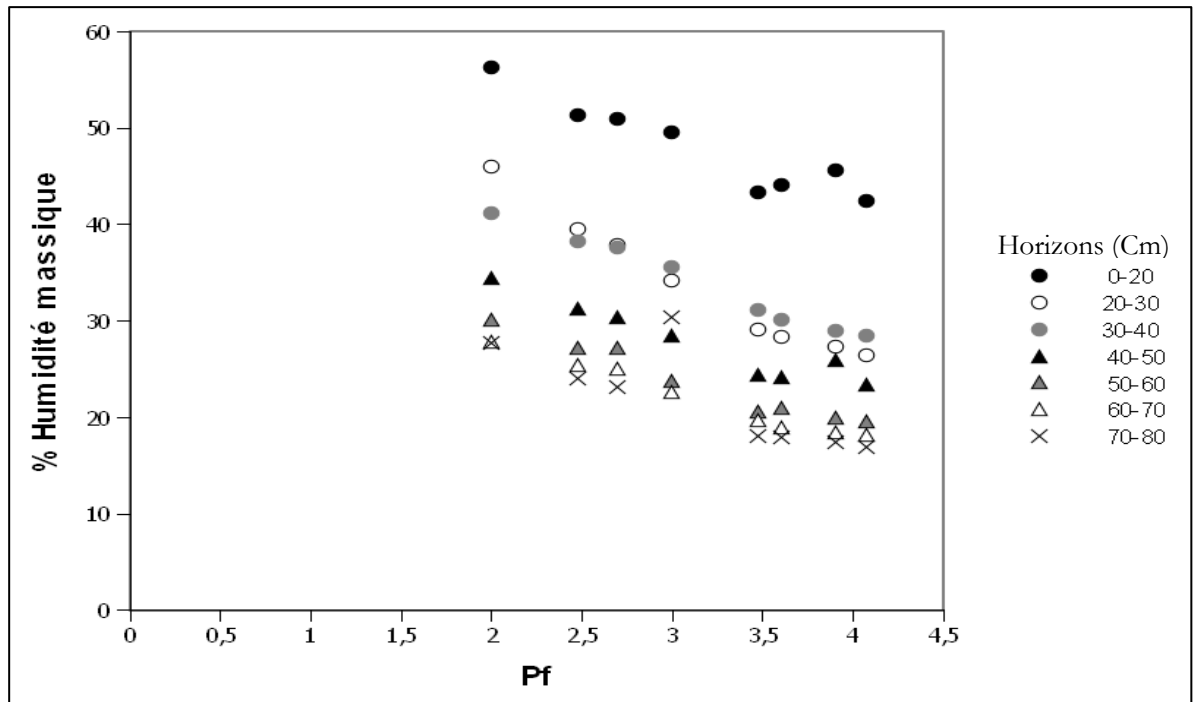


Fig.10. Répartition de l'humidité massique dans les différents horizons du sol de la fosse 1

3.3.2 Résistivité électrique du sol

Une forte résistivité électrique du sol correspond à un sol avec beaucoup d'éléments grossiers (Tab.2), alors qu'une faible résistivité signifie que le sol contient beaucoup d'éléments fins (argiles, matière organique, limons...) et une réserve hydrique importante. Le profil de résistivité (le long du transect en courbe de niveau) met en évidence la forte variabilité du sol inter et intra-placettes et à différentes profondeurs (Fig.11, 12).

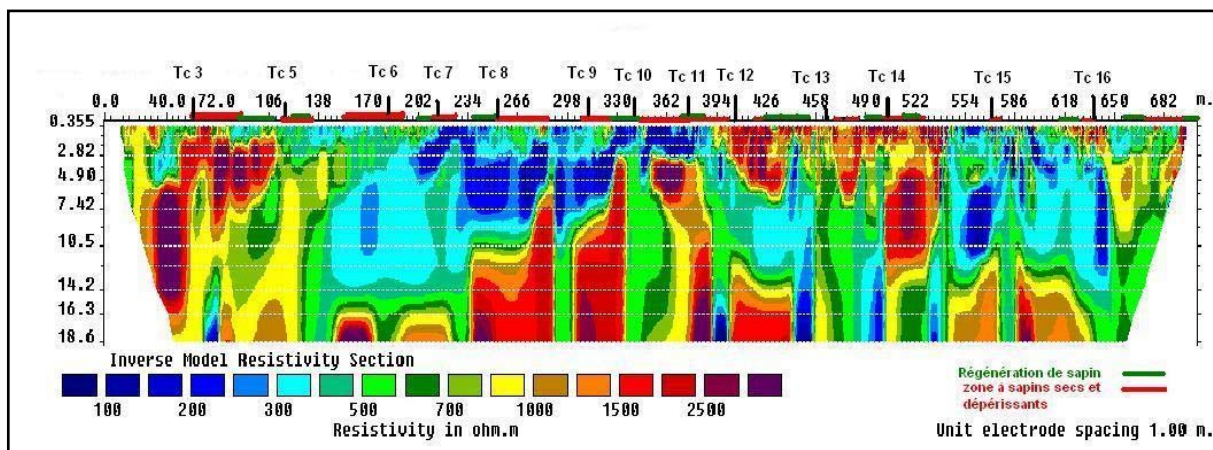


Fig. 11. Profil tomographique le long du transect en courbe de niveau (de 0 à environ 700 m) (source UMR EMMAH Avignon). Sur l'axe horizontal en haut du graphique, les zones à sapins secs et dépérissants sont indiquées en rouge (ainsi que les zones à régénération de Sapin, en vert)

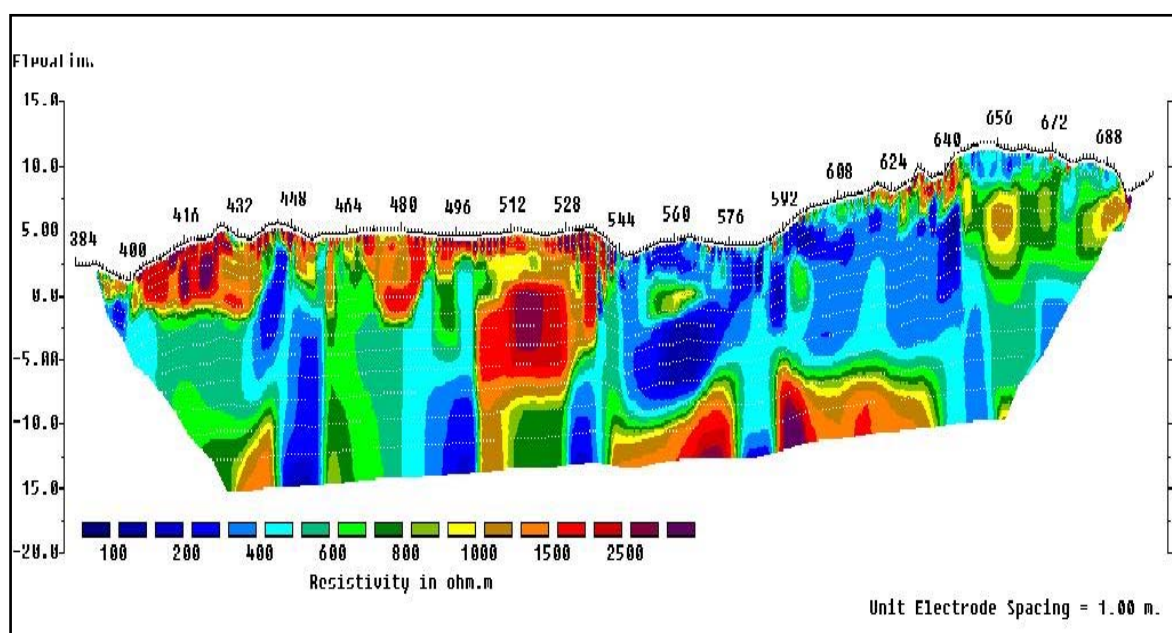


Fig. 12. Profil du résistivimètre sur la partie Est du transect (placettes TC12 à TC16, de 390 m à 700 m environ), avec le profil vertical sur l'axe de gauche (en mètres, décalage topographique en surface et profondeur du profil de résistivité mesurée) (source UMR EMMAH Avignon)

Sur ces figures, les zones de coloration rouge et violette correspondent aux portions du sol à forte résistivité électrique. Dans les parties allant de 0 à 106 m (Tc 3 et Tc 5) et de 394 à 522 m (Tc 12, Tc 13 et Tc 14). Dans la partie comprise entre 106 et 394 m (de coloration bleue) (Tc 6, Tc 7, Tc 8, Tc 9, Tc 10 et Tc 11), la résistivité électrique est faible dans les 5 premiers mètres de profondeur, ce qui indique un substrat avec une bonne réserve hydrique, mais où les arbres dépérissent quand même. Ces arbres correspondent à ceux

des placettes (TC3, TC5, TC6, TC7, TC8, TC9, TC10 et TC11) où la défoliation est supérieure à 25 %.

La figure 10 indique aussi que la résistivité électrique est importante (donc la réserve hydrique est faible) aux extrémités du profil : au niveau de la combe, zone d'éboulis avec dalles rocheuses, et surtout vers la crête du fait de la présence de dalles rocheuses.

3.3.3. Récapitulation des données du sol sur les 16 placettes

Les données du sol sont récapitulées dans le Tableau 1. La réserve utile est calculée en supposant que la différence entre capacité au champ et point de flétrissement permanent est constante et égal à la valeur mesurée sur Dvx2. C'est une hypothèse forte mais il n'était pas possible, dans le temps imparti au stage, de calculer des courbes de rétention sur chacune des 16 placettes.

Tableau: 1. Récapitulatif des données du sol sur les 16 placettes.

Placettes	Profondeur moyenne Cm	Eléments grossiers affleurants %	Eléments grossiers dans la fosse ¹ %	Réserve Utile mm	Résistivité moyenne 0-1 m Ω.m	Résistivité moyenne 1-5 m Ω.m	Résistivité moyenne 5-20 m Ω.m
1	54	30	43	46			
2	59	70	47	48			
3	44	25	12	58	1164	1606	885
4	70	20	28	76			
5	48	25	27	53	519	618	815
6	62	20	24	70	600	439	471
7	53	35	24	61	227	326	530
8	27	15	21	32	664	274	955
9	22	20	25	25	572	309	1284
10	28	5	22	33	325	960	586
11	39	45	42	34	582	530	1322
12	38	30	22	44	3178	1442	689
13	26	70	51	19	1408	964	648
14	27	20	35	26	1594	1410	1569
15	47	50	25	53	388	430	725
16	44	10	32	45	2450	669	470

Les placettes n'ont pas été traversées par le profil du résistivimètre car elles sont loin de la ligne.

¹ Estimations obtenues à partir de l'analyse des photographies de fosses

La résistivité de surface (<1m) est corrélée positivement au taux d'éléments grossiers ($r=0.13$) et négativement à la profondeur du sol ($r=-0.13$), et ainsi négativement avec la RU ($r=-0.13$). Ce résultat était attendu même si les corrélations sont faibles et non significatives ($p>0.1$).

Les valeurs de réserve utile (entre 19 et 76 mm) ou de résistivité (entre 227 et 2450 $\Omega.m$) varient beaucoup entre placettes.

3.3.4. Lien entre sol, sous-sol, structure du peuplement et dépérissement

L'effet placette sur le pourcentage de défoliation individuel moyen est fortement significatif ($p=0,004$), comme l'illustre la figure 13. La défoliation des sapins pectinés varie le long du transect de 64% pour TC 10 à 12,5% pour TC 2. Ce résultat indique que les variations microclimatiques ou l'effet « distance à la combe » est plus faible que l'effet « station locale ».

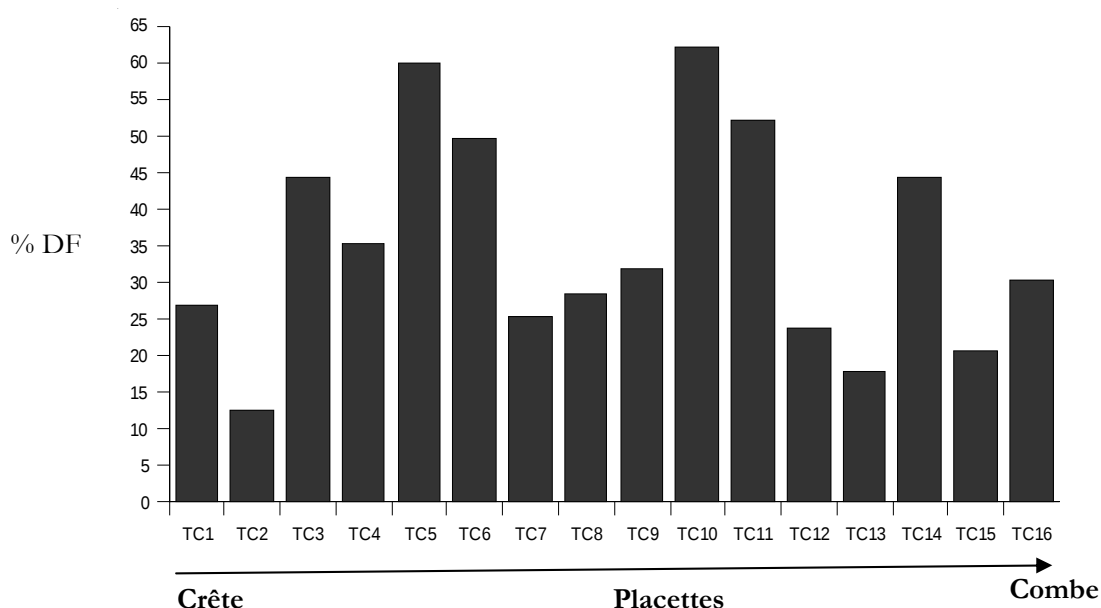


Fig. 13. Défoliation moyenne des sapins par placette le long du transect en courbe de niveau.

Les tableaux 2 et 3 donnent respectivement la liste des variables les plus corrélées avec le taux de défoliation (issu de la caractérisation sanitaire) et avec le taux de sapins secs en surface terrière (issu de l'inventaire). Ces relations entre variables environnementales et taux de dépérissement nous permettent d'analyser quels sont les facteurs du sol, du sous-sol, ou de la structure du peuplement qui expliquent la forte variabilité de défoliation entre placettes.

Tableau 2 : Coefficients de corrélation entre les variables étudiées et le pourcentage de défoliation des dominants (analyse sanitaire)

Variables	Coefficient de corrélation	Significativité *
Pente	0,19	NS
Distance à la combe	-0,09	NS
Eléments grossiers de surface	-0,58	**
% cailloux par analyse d'image	-0,30	NS
résistivité moyenne 0-1m	-0,29	NS
Résistivité moyenne 5-20 m	0,16	NS
Réserve utile	0,11	NS
Nb de tiges entre 700 et 1100	0,50	**
Indice H' de Shannon	0,43	**
Age moyen des arbres dominants	-0,33	NS

* : corrélation significative au seuil 5 % de Spearman.

Le tableau 2 indique qu'il y a trois types de variables fortement corrélées à la défoliation des arbres dominants :

- o Les variables de structure du peuplement : le nombre de tiges appartenant à la classe de circonférence 700 - 1100 mm ($r=0,50$) et l'indice de diversité spécifique H' de Shannon ($r=0,43$) sont corrélés positivement à la défoliation. Plus l'âge moyen des dominants est élevé, plus la défoliation est faible ($r=-0,33$).
- o Les variables caractérisant le sol en surface : la présence d'affleurements rocheux ($r=-0,58$), le pourcentage d'éléments grossiers dans les fosses ($r=-0,30$) mais aussi la résistivité électrique des horizons superficiels ($r=-0,29$) sont négativement corrélés à la défoliation.
- o La variable caractérisant le sous-sol profond : la résistivité électrique du sous-sol en profondeur est corrélé positivement à la défoliation ($r=0,16$ entre 5 et 20 m et $r=0,15$ entre 1 et 5 m).

La première conclusion de cette analyse est que le facteur prépondérant expliquant la défoliation des sapins, à une même altitude, est la structure du peuplement. Deux causes peuvent être invoquées : (i) une forte compétition intra et inter spécifique augmentent la défoliation, (ii) la présence de sapins plus vulnérables à la défoliation dans une composante dimensionnelle particulière du peuplement (ceux de circonférence intermédiaire).

Le second résultat est contre-intuitif : la défoliation est plus faible quand il y a beaucoup d'éléments grossiers en surface (% d'éléments grossiers dans les fosses et % d'affleurements rocheux) et donc une résistivité plus forte entre 0 et 1 m. L'hypothèse

la plus probable est que les sapins situés sur ces sols sont moins vulnérables car déjà acclimatés au stress.

Le dernier résultat est que la défoliation diminue quand la résistivité en profondeur diminue. Ceci indique que les arbres dominants, situés sur un substratum avec failles et disponibilité en eau potentielle, sont capables d'aller chercher de l'eau en profondeur, grâce à leur enracinement, pour compenser leurs pertes en évapotranspiration (Duchaufour, 1997).

De plus, la structure du peuplement n'est pas corrélée avec la résistivité en profondeur ($r=-0.03$), ni avec le taux d'éléments grossiers dans la fosse ($r=0.12$). Ces relations nous permettent de séparer l'impact de ces différents facteurs sur la défoliation.

Tableau 3 : Coefficients de corrélation entre les variables étudiées et le pourcentage de secs en surface terrière (analyse de l'inventaire)

Variables	Coefficient de corrélation	Significativité
Pente	-0,31	NS
Distance à la combe	-0,39	NS
Eléments grossiers de surface	-0,19	NS
% cailloux par analyse d'image	-0,11	NS
Résistivité moyenne 0-1m	-0,27	NS
Résistivité moyenne 5-20 m	0,06	NS
Réserve utile	0,38	*
Nb de tiges entre 700 et 1100	0,71	**
Indice H' de Shannon	0,71	**
Age moyen des arbres dominats	-0,24	NS

Les résultats sont similaires avec le taux d'arbres secs dans l'inventaire. Les coefficients de corrélation présentés dans le tableau 3 indiquent que, encore plus que pour la défoliation, la mortalité est fortement liée à la structure dimensionnelle (la compétition) et à la diversité spécifique du peuplement ($r=0,79$ pour le nombre de tiges entre 700 et 1100 mm de circonférence, et $r=0,74$ pour H'). En ce qui concerne les caractéristiques du sol en surface, on retrouve le même résultat paradoxal ; ici, on trouve même une corrélation positive entre la réserve utile et le taux d'arbres secs ($r=0.38$). La principale différence avec l'analyse du taux de défoliation est l'effet significatif de la distance à la combe dans le cas du taux d'arbres secs ($r=-0.43$) alors que ce n'était pas le cas avec le taux de défoliation ($r=-0.09$).

Contrairement à la défoliation, la pente est fortement corrélée avec le pourcentage de sapins secs, mais dans le sens opposé à ce qu'on pouvait attendre : plus la pente est forte, moins il y a d'arbres secs (pour la gamme de pente correspondant à ces placettes : de 35 à 47,2 degrés).

4. DISCUSSION

Notre objectif était d'analyser et hiérarchiser les facteurs du phénomène de dépérissement et de mortalité du Sapin pectiné dans la région d'étude, hormis le principal facteur prédisposant qu'est *a priori* l'altitude (les arbres situés en dessous de 1200 m sont beaucoup plus affectés), étudié par ailleurs (autre volet du projet Dryade).

Les deux notations sanitaires d'août 2007 et de juillet 2008 montrent une grande similarité : les placettes présentent à peu près les mêmes intensités de défoliation et de coloration anormale. La proximité de ces deux estimateurs est due à leur construction puisque dans les deux cas un arbre sec est compté comme ayant 100% de défoliation et de coloration anormale. Ceci n'exclut pas totalement une légère variation de l'état sanitaire car les périodes des notations sont un peu différentes (la chute naturelle des aiguilles se déroule en août). Quoi qu'il en soit, la cohérence entre les deux campagnes montre que la méthodologie de notation est satisfaisante.

Les corrélations entre les différentes variables étudiées ont montré que la structure du peuplement influence fortement le taux de mortalité des arbres ainsi que la défoliation. Les arbres de taille intermédiaire apparaissent plus vulnérables que les arbres dominants, probablement parce que leur système racinaire est moins développé, mais aussi plus vulnérables que les arbres de petite taille car ils nécessitent plus de ressources pour leur entretien. Il s'agit vraisemblablement d'arbres suffisamment gros pour que le coût d'entretien de leur structure (respiration) soit important, de plus, une partie d'entre eux sont dominés et n'accèdent pas à toutes les ressources nécessaires. La forte concurrence réduit la disponibilité en eau, notamment pendant les périodes de sécheresse (Bert, 1993). Dans les Vosges, Becker et Lévy (1987) ont noté que les arbres qui ont le mieux résisté aux sécheresses successives sont ceux qui étaient les plus vigoureux et avaient subi le moins de compétition. Ceci va dans le même sens que la corrélation positive observée ici entre l'indice de compétition des sapins dominants et leur taux de défoliation. Par extrapolation, on peut supposer que les différences de taux de dépérissement entre les 16 placettes du transect s'expliquent, au moins en partie, par l'état concurrentiel des arbres préalablement à la sécheresse de 2003. Ces résultats indiquent que la gestion présente et future pourrait jouer un rôle non négligeable sur l'état sanitaire des arbres. À noter que les fortes températures (ce qui était le cas lors de l'été 2003) accélèrent le dessèchement des feuilles et interviennent aussi spécifiquement sur la physiologie, notamment en inhibant la photosynthèse (Béda, 2006), puis en dégradant les pigments, en particulier les chlorophylles, ce qui peut expliquer les taux importants de défoliation et de coloration anormale sur le transect en courbe de niveau.

L'effet climatique est modulé par les caractéristiques stationnelles locales, notamment le caractère rocheux du substrat et la présence de barres rocheuses en profondeur. En effet, l'existence de réserves hydriques dans le substratum profond (détectées par la résistivité selon la technique mise en œuvre par l'UMR EMMAH, Centre INRA d'Avignon) semble jouer un rôle favorable pour les arbres dominants, *a priori* capables de puiser de l'eau en profondeur. Dans les Vosges, Becker (1987) suppose que le dépérissement du Sapin a été déclenché par les épisodes de sécheresse dans les stations où les conditions d'alimentation hydrique étaient défavorables. De manière surprenante, dans notre étude, la corrélation entre le dépérissement et la réserve utile en eau du sol entre 0 et 1 m, estimée par résistivimétrie, est positive sur les placettes étudiées. Ce constat incite à penser que d'autres facteurs interagissent (cf. Annexe 7).

La mortalité des sapins pourrait être expliquée par la présence de dalle rocheuse dans les 10 premiers mètres du substrat (sol + roche sous-jacente plus ou moins fissurée). La prospection racinaire de l'eau souterraine est limitée par la présence de dalles rocheuses.

Parmi les autres facteurs envisageables, les variations micro-météorologiques ont aussi été étudiées. Des stations météorologiques de type « Hobo² » ont été mises en place au sommet de la canopée sur 4 placettes (Dvx3, TC 5, TC 11 et TC15) et indiquent que les températures diminuent légèrement en se rapprochant de la combe, ce qui pourrait expliquer la diminution du déficit foliaire et du taux de mortalité des sapins dans les placettes qui en sont proches (TC12, TC13, TC14, TC15 et TC16). Mais cet effet est sans doute faible car nous avons des variations très fortes d'état sanitaire pour des placettes très proches et donc soumises au même microclimat ; de plus, il est difficile à interpréter de manière simple car il y a aussi une augmentation de l'âge des sapins en allant vers la combe.

L'action anthropique peut également jouer un rôle dans la défoliation et la mortalité des sapins, notamment dans les placettes où nous avons des tiges de gros diamètres en compétition. Ceci peut être dû à la gestion passée des peuplements (Becker, 1987), avant la sécheresse 2003 : les éclaircies accidentelles (naturelles) ou sélectives n'ont pas concerné tous les arbres de toutes les placettes d'une manière équivalente. Ceci pourrait expliquer la forte corrélation entre le niveau de défoliation de la placette et le nombre d'individus (sapins) dont les circonférences sont comprises entre 700 et 1100 mm.

Bien que le Gui soit présent dans la majorité des placettes, sa corrélation avec la défoliation des sapins ou avec le taux de secs n'est pas significative. Ceci peut être dû au manque de précision du protocole utilisé concernant l'estimation de sa présence (note qualitative de 0 à 3). De nombreuses études ((Noetzli, 2002, Tsopelas, 2004) ont montré que le Gui est un facteur important qui réduit la vigueur des arbres et les prédispose et/ou aggrave l'impact d'une sécheresse intense. D'où la nécessité d'améliorer le protocole pour repérer l'effet de ce parasite sur le dépérissement.

Des carences en minéraux pourraient aussi expliquer ce dépérissement, en provoquant une réduction des capacités photosynthétiques (par chlorose des aiguilles ou baisse de la teneur en azote et phosphore). Contrairement à ce que Thomas *et al.*, (2002) observent dans les Vosges, il est peu vraisemblable qu'il y ait une carence en magnésium dans ces zones calcaires, mais un manque en phosphore est possible.

D'autres facteurs tels que la pollution atmosphérique (ozone), pourraient être des paramètres à observer afin d'expliquer les variations de dépérissement sur le versant nord du Mont-Ventoux.

²

Enregistreurs miniatures autonomes : <http://www.prosensor.com/>

5. CONCLUSION

Le phénomène de dépérissement est complexe. Sur le Mont-Ventoux, notamment sur le transect en courbe de niveau étudié ici, les causes sont loin d'être identifiées de manière catégorique. Après le facteur primordial, l'altitude, étudiée par ailleurs, facteurs interviennent. Celui qui semble expliquer plus de 50% de la mortalité des arbres sur le transect à altitude constante est la pression de compétition pour des sapins de taille intermédiaire (circonférence et hauteur).

La réserve utile en eau du sol ne semble pas expliquer la variabilité spatiale du dépérissement. Mais des difficultés méthodologiques fortes existent. Ainsi, celle-ci est fortement liée au pourcentage d'éléments grossiers, qui peuvent être mal estimée à partir d'une fosse pédologique qui n'est pas forcément représentative de la placette. D'où la nécessité de mesurer cette variable en s'appuyant sur la prospection tomographique au niveau des arbres.

La sécheresse semble être le facteur déclenchant du dépérissement. Mais le rôle déclencheur du facteur climatique ne peut être envisagé qu'à travers l'étude de la réaction des arbres en peuplement, selon les conditions stationnelles et selon les caractéristiques de l'arbre et du peuplement (actuel et passé). Ces facteurs sont en effet apparus ici comme les plus prédisposants, pour une altitude donnée, au phénomène du dépérissement des sapins du Mont-Ventoux.

Le travail réalisé ici ne permet pas encore d'expliquer toute la variabilité du dépérissement le long du transect. Au-delà de cette étude, il faudra affiner et approfondir l'étude des facteurs, et identifier les zones les plus vulnérables.

L'exploitation des photographies effectuées par un vol avion en juin-juillet 2008 par l'Unité EMMAH permettra une meilleure analyse du phénomène du dépérissement à l'échelle du versant ; les bouquets d'arbres dépérissants seront bien localisés et identifiés, favorisant une étude plus affinée.

Aussi afin de confirmer les résultats impressionnant obtenu par la tomographie, l'ouverture de fosses pédologique au niveau du transect en courbe de niveau.

Pour une meilleur compréhension du phénomène et afin d'identifier les variables explicatives du dépérissement, une analyse multivariée permettra d'étudier les différentes interactions entre les variables étudiée dans cette présente étude.

Enfin, il semble que la gestion puisse diminuer la vulnérabilité des arbres au dépérissement en réduisant la densité de peuplement modérées, en évitant de maintenir trop d'arbres de dimensions intermédiaires (apparus dans cette étude comme étant les plus vulnérables). En limitant la compétition inter-arbres, la demande en eau sera réduite et les sapins pourront maintenir une meilleure vigueur et une plus grande résistance aux sécheresses estivales.

Une recherche sur les d'espèces plastiques et adaptées aux perturbations engendrées par le changement climatique et la prolongation des périodes de sécheresse, dans le cadre des reboisements est fortement recommandé pour éviter les problèmes de mortalité massive et des dépérissements.

6. REFERENCES

- Abdenbi Z. A., 2003. Le dépérissement des forêts du Maroc: analyse des causes et stratégie de lutte. *Sécheresse*, 14 (4), pp. 209 - 218.
- Amato M., Basso, B., Celano, G., Bitella, G., Morelli, G. and Rossi, R., , 2008. In situ détection of tree root distribution and biomass by multielectrode resistivity imaging. *Tree Physiology* (28), pp. 1441-1448.
- AMM A., 2006. *Etude de la dynamique du sapin pectiné (Abies alba Miller) en situation méditerranéenne : modélisation de la dispersion efficace sur le Mont Ventoux. Recherche en bioécologie biodiversité et écologie continentale, science de l'environnement terrestre. Master 2. UNIV. P. CEZANNE, AIX-MARSEILLE III*, 39 p.
- Becker M., 1987. Santé du Sapin pectiné (*Abies alba*. Miller). Etude écologique et dendrochronologique. *Annales des Sciences Forestières.*, 44, pp. 403-416.
- Béda N., Huc, R., Granier, A. and Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest sciences.*, 63, pp. 625-644.
- Bert G. D., 1993. Impact of ecological factors, climatic stresses, and pollution on growth of the silver fir (*Abies alba*) in the Jura mountains: an ecological and dendrochronological study. . *Acta ecological*, 14, pp. 229-246.
- Cailleret M., 2007. *Dendroécologie comparée du Sapin pectiné et de Hêtre commun le long d'un gradient altitudinal. Mémoire de Master 2. Université de Bordeaux 1.* , Bordeaux, 2007, 23 p.
- Certini G., Corti, G. and Ugolini, F.C., 2000. Influence of soil proprieties on the mortality of silver fir in Tuscany, Italy. . *European Journal of Forest Research.*, 119, pp. 323 - 331.
- Chouteau M., Gloagun, E., 2003. [mis à jour: avril 2003]. *Tomographie électrique en génie et environnement* [en ligne]. Montréal, Ecole polytechnique de Montréal. Disponible sur Internet, <http://geo.polymtl.ca/~chouteau/documents/GML6201_tomoelec.ppt>, [consulté le 18/08/2008].
- Dreyfus P., Oddou, M.S., 2004. Prévoir l'évolution de la diversité pour différents itinéraires sylvicoles. . *Rendez-vous technique de l'ONF: Diversité génétique des arbres forestiers* (1), pp. 97-104.
- Duchaufour P., 1997. *Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement. Enseignement des sciences de la terre.* Masson ed. Paris, 291 p.
- Duchesneau R., Yakasaki, S. and Doyon, F., 2006. L'influence des changements climatiques sur la productivité forestière. *IQAFF. Fiche de transfert scientifique.*, pp. 2.
- Fourrier A., 2007. *Mise en relation des facteurs stationnelles et bioclimatiques avec le dépérissement des sapinières du Mont Ventoux. Mémoire de Master 1 Université de Bordeaux 1, Bordeaux*, 10 p.

- IPCC, 2007. *Régional Climate Projection. in : climate change 2007: The physical Science Basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental panel of climate change. [Solomon S., OIN M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., & Mille H. L. (eds.)].* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ladier J., 2004. *Les stations forestières des préAlpes sèches. définition, répartition, dynamique, fertilité.* Office national des forêts - Direction territoriale Méditerranée., 124 p.
- Lazarus B. E., Schaberg, P. G., DeHayes, D. H. and Hawley, G. J., 2004. Severe red spruce winter injury in 2003 creates unusual ecological event in the northeastern United States. . *canadien Journal of Forest Reserches.* (34), pp. 1784 - 1788.
- Lebourgeois F., Garnier, A. and Bréda, N., 2001. Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1976 et 1993: Réflexion en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers *Annals of Forest Sciences.* (58), pp. 733-754.
- Legay M., 2007. La forêt face aux changements climatiques: impacts attendus et premières orientations d'adaptation. *In: ONF/INRA (Ed.), Association française de prévention des catastrophes naturelles.*, Paris, 29 septembre 2007. p. 53.
- Legrand I., Asta, J., 1993. Le dépérissement observé en Isère sur sapin et épicéa: relations avec les caractéristiques physico-chimiques des écorces. *Annals of Forest sciences,* 58, pp. 235 - 246.
- Lévy G., Becker, M., 1987. Le dépérissement du sapin dans les Vosges: Rôle primordial de déficits d'alimentation en eau. . *Ann. Forest. Sci.*, 44 (4), pp. 403 - 416.
- Mattson W. J., Haack, R.A., 1987. The role of drought in Outbreaks of plant-eating insects. Drought's physiological effects on plants can predict its influence on insect populations. *BioScience.*, 37 (2), pp. 110-118.
- Montenat C., Janin, M. C., and Barrier, P. , 2004. L'accident du toulourence : une limite tectonique entre la plate-forme provençale et le Bassin vocontien à l'Alptien - Albien (SE France). . *Comptes Rendus Géoscience* (336), pp. 1301 - 1310.
- Mortier F., 1995. Dynamique globale du CO² dans la biosphère. . *ONF. Bultin Technique*, 29 (Numéro spécial), pp. 5.
- Noetzli K. P., Muller, B. and Sieber, T. N., , 2002. Impact of population dynamics of white mistletoe (*Viscum album* ssp. *abietis*) on European silver fir (*Abies alba*). . *Annals of forest sciences*, 60, pp. 773 - 779.
- Quentin C., Bigorre, F., Bréda, N., Granier, A. and Tessier, D., 2001. Etude des sols de la forêt de Hesse (Lorrain). Contribution à l'étude du bilan hydrique. *Etude et gestion des sols*, 8 (4), pp. 215-228.
- Richard L. A., 1941. A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil sciences*, 51, pp. 377 - 386.

- Riopel M., Bégin, J., 2006. Réaction de tiges de sapin baumier et d'épinettes de 10 ans après une coupe avec protection des petites tiges marchandes. Forum de transfert sur la recherche en aménagement et en environnement forestiers. . pp. 6
- Schwitter R., Hermann, B., 2000. Le sapin blanc est la colonne vertébrale de nombreux écosystèmes forestiers. *DOSSIER SAPIN BLANC : La sylviculture du sapin blanc.* , pp. 4.
- Thomas A. L., Gégout, J. C., Landmann, G., Dambrine, E. and King, D, 2002. Relation between ecological conditions and fir decline in a sandstone region of the Vosges mountains (northeastern France). *Annals of forest sciences*, 59, pp. 265 - 273.
- Torrelli N., Shortle, W.C., Cufar, K., Ferlin, F. and Smith, K., 1999. Detecting changes in tree health and productivity of silver fir in Slovenia. *European Journal of Forest Pathologie*, 29, pp. 189-197.
- Tsopelas P., Angelopoulos, A., Economou, A. and Souliidi, N., 2004. Mistletoe (*Viscum album*) in the fir forest on Mount Paros. Greece. *Forest Ecology and Management* 202, pp. 59 - 65.
- Unité de recherche forestière méditerranéenne U., 2007. *Projet Dryade "La vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques: de l'arbre aux aires climatiques"* Rapport à 1 an partenaire N° 5. Avignon. 9 p.

7. LISTE DES ABREVIATIONS

URFM: Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes ; depuis fin 2007 : Unité de Recherche « Écologie des Forêts Méditerranéennes ».

INRA: Institut National de la Recherche Agronomique.

RTM : Restauration de Terrain de Montagne

EMMAH: Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydro systèmes.

APHE : régime saisonnier Automne-Printemps-Hiver-Eté : ceci représente l'ordre décroissant des saisons selon leur pluviométrie moyenne.

RES2 DM: Résistivimètre à 2 dimensions.

Dvx 2 placette n° 2 du Mont-**Ventoux** - projet **Dryade**

DSF: Département de Santé des Forêts

TC: Transect en courbe de niveau.

%DEF : Pourcentage de défoliation des branches.

NoteT: Note totale de la notation sanitaire.

CA: Coloration anormale du houppier notable de l'arbre.

G : Surface terrière (m²/ha)

8. LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. RECAPITULATIF DES DONNEES DU SOL SUR LES 16 PLACETTES..... 22

TABLEAU 2 : COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE LES VARIABLES ETUDIEES ET LE POURCENTAGE DE DEFOLIATION DES DOMINANTS (ANALYSE SANITAIRE) 24

TABLEAU 3 : COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE LES VARIABLES ETUDIEES ET LE POURCENTAGE DE SECS EN SURFACE TERRIERE (ANALYSE DE L'INVENTAIRE)..... 25

TABLEAU 4: CLASSES DE CIRCONFERENCE ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

TABLEAU 5: CLASSES DE HAUTEUR ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

9. LISTE DES FIGURES

FIG.1. CARTE DE LOCALISATION DES PARCELLES ETUDIEES (VERSANT NORD DU MONT-VENTOUX)7

FIG.2. DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE ISSU DES DONNEES DE LA STATION METEO DU MONT-SEREIN (1994 - 2007)8

FIG.3. PEUPLEMENT DE SAPIN PECTINE (ABIES ALBA MILLER)9

PHOTO N° 1: RESISTIVIMETRE 11

PHOTO N° 2: PROFIL DU RESISTIVIMETRE 11

FIG.4. COMPARAISON DES POURCENTAGES DE DEFOLIATION (DF ET DF) 2007-2008 15

FIG. 5. COMPARAISON DES POURCENTAGES DE DEFOLIATION, DE COLORATION ANORMALE (CA) ET SAPINS SECS (EN EFFECTIF ET EN SURFACE TERRIERE)..... 16

FIG.6. DEFICIT FOLIAIRE DES SAPINS EN FONCTION DE LA CLASSE DE HAUTEUR (A GAUCHE) ET DE LA CLASSE DE CIRCONFERENCE (A DROITE) 17

FIG. 7. REPARTITION DES TAUX DE SAPINS SECS PAR CLASSES DE CIRCONFERENCES (MM) 18

FIG. 8. INVENTAIRE (2007) EN CIRCONFERENCE PAR PLACETTE : SAPINS ET AUTRES ESPECES, EN DISTINGUANT ARBRES MORTS ET VIVANTS (SUR L'AXE VERTICAL SONT FIGUREES LES LIMITES DE LA CLASSE 700-1100 MM)..... 18

FIG. 9. LIEN ENTRE LA PRODUCTION DE CONES ET LA DEFOLIATION 19

FIG.10. REPARTITION DE L'HUMIDITE MASSIQUE DANS LES DIFFERENTS HORIZONS DU SOL DE LA FOSSE 1 20

FIG. 11. PROFIL TOMOGRAPHIQUE LE LONG DU TRANSECT EN COURBE DE NIVEAU (DE 0 A ENVIRON 700 M) (SOURCE UMR EMMAH AVIGNON). SUR L'AXE HORIZONTAL EN HAUT DU GRAPHIQUE, LES ZONES A SAPINS SECS ET DEPERISSANTS SONT INDIQUEES EN ROUGE (AINSI QUE LES ZONES A REGENERATION DE SAPIN, EN VERT) 21

FIG. 12. PROFIL DU RESISTIVIMETRE SUR LA PARTIE EST DU TRANSECT (PLACETTES TC12 A TC16, DE 390 M A 700 M ENVIRON), AVEC LE PROFIL VERTICAL SUR L'AXE DE GAUCHE (EN METRES, DECALAGE TOPOGRAPHIQUE EN SURFACE ET PROFONDEUR DU PROFIL DE RESISTIVITE MESUREE) (SOURCE UMR EMMAH AVIGNON) 21

FIG. 13. DEFOLIATION MOYENNE DES SAPINS PAR PLACETTE LE LONG DU TRANSECT EN COURBE DE NIVEAU. 23

FIG.14. DETERMINATION DU POURCENTAGE D'ELEMENTS GROSSIERS PAR ANALYSE PHOTOGRAPHIQUE 41

FIG. 15 LOCALISATION DES ARBRES SUIVIS DANS LES PLACETTES (TC 1- 9) SUR LE PROFIL TOMOGRAPHIQUE..... 42

10. ANNEXES

Tableau des données brutes

Placettes	DVX1	DVX2	DVX3	DVX4	DVX5	DVX6	DVX7	DVX8	DVX9	DVX10	DVX11	DVX12	DVX13	DVX14	DVX15	Annexe 1 DVX16
X	832252,73	832259,37	832329,05	832365,16	832384,21	832439,25	832483,79	832535,57	832576,99	832602,56	832640,80	832666,32	832721,07	832768,01	832804,71	832864,26
Y	1913455,22	1913502,22	1913498,76	1913531,30	1913519,24	1913530,33	1913531,23	1913519,83	1913517,83	1913532,57	1913533,88	1913537,42	1913546,79	1913566,38	1913602	1913639,21
altitude	1138,13	1108,22	1125,16	1109,96	1122,24	1128,04	1128,16	1123,18	1131,39	1124,39	1131,60	1134,89	1142,67	1136,71	1131,99	1128
pente en °	35	37,50	40,60	40,80	37,20	39,20	42	45	44,20	47,20	45	42	40	47	46	45
exposition (grades)	390	395	385	380	383	386	0	0	385	360	370	370	370	380	375	380
nb de tiges entre 700 et 1100	31,25	13,89	32,50	13,64	37,50	37,21	6,25	12,73	16,67	11,90	23,08	5,56	23,08	16,67	9,38	19,05
taux de sec en G	48,65	0,00	28,65	28,65	76,77	67,37	36,39	17,81	23,97	58,29	46,48	0,00	5,79	29,61	1,89	14,08
taux sec en effectif >10cm	6,25	0,00	30,00	15,91	46,88	53,49	10,94	16,36	16,67	11,90	36,54	3,70	5,13	10,00	9,38	9,52
taux sec dom	15,38	0,00	47,37	25,00	60,00	53,85	8,33	31,25	17,65	40	42,86	0,00	5,00	36,36	0,00	11,11
l'indice H' de Shannon	0,20	-0,59	-0,25	-0,65	-0,09	-0,09	-0,72	-0,35	-0,19	-0,86	0,25	-0,92	-0,89	-0,62	-0,63	-0,52
Circonf moyenne total	1199,60	816,40	1097,20	958,20	1014,40	1060,20	1272,40	960,80	1103,80	1354,00	1253,60	1115,20	1362,00	1192,00	1646,60	1434,00
Hauteur moyenne total	13,50	10,60	16,14	13,89	13,69	15,53	14,32	13,66	12,26	17,32	17,24	15,80	17,86	14,40	21,36	17,24
R amont/aval total	0,91	0,98	0,86	0,86	0,74	0,53	0,72	0,46	0,67	0,70	0,62	0,66	0,57	0,88	0,84	0,83
Circonf moyenne sapin	1341,67	820,50	1097,20	1001,50	1014,40	1060,20	1358,00	960,80	1164,75	1354	1253,60	1198,00	1362,00	1192,00	1646,60	1434,00
Hauteur moyenne sapin	16,13	11,55	16,14	14,44	13,69	15,53	13,66	13,88	17,32	17,24	17,24	16,20	17,86	14,40	21,36	17,24
Taille houppier amont sapin	12,57	8,85	9,82	7,34	6,65	4,73	8,53	4,58	6,30	9,75	6,78	6,57	6,94	8,92	9,72	7,10
Taille houppier aval sapin	13,10	8,50	11,40	8,86	8,95	8,99	12,53	9,96	9,48	13,85	11,00	11,50	12,22	10,10	11,60	8,60
R amont/aval sapin	0,96	1,04	0,86	0,83	0,74	0,53	0,68	0,46	0,66	0,70	0,62	0,57	0,57	0,88	0,84	0,83
Relation hauteur/diam	11,25	12,98	14,71	14,50	13,50	14,65	11,25	14,22	11,11	12,79	13,75	14,17	13,11	12,08	12,97	12,02
Hauteur moyenne 5 dom nouvelle mesures avril 2008	14,78	11,60	15,41	13,91	13,79	15,62	15,40	13,61	13,48	17,23	17,24	15,58	17,54	14,30	21,36	17,42
Cir moyenne 5 dom nouvelle mesure avril 2008	1071,60	736,09	1058,83	946,60	984,40	1082,40	1174,20	945,80	1082,60	1325,20	1240,40	1050,50	1342,20	1168,20	1630,60	1406,60
Indice de comp	21,94	14,42	18,52	15,50	20,31	16,11	21,84	21,28	23,51	22,00	28,23	24,42	23,81	25,22	32,08	35,06
nb cernes 2008 (Age des arbres)	65,60	55,00	70,00	74,40	73,00	74,40	93,50	79,75	93,80	75,40	88,40	97,28	138,20	47,40	92,80	85,20
hauteur moyenne 2008 (arbres dominants)	14,78	11,60	14,59	14,56	12,75	14,89	14,53	12,05	12,67	17,22	14,40	15,34	15,82	12,24	18,34	17,72
Caractérisation pédologique																
% en EG du premier horizon	90	95	60	80	85	50	70	60	75	40	60	75	75	40	75	60
% en EG du second horizon	70	80	80	80	65	80	55	0	90	85	80	90	90	90	90	85
% en EG du troisième horizon	95	80	80	70	90	50	0	0	95	0	0	0	0	0	0	0
% en EG du quatrième horizon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prof du premier horizon	15	30	12	25	31	30	25	20	20	45	25	40	27	16	34	28
Prof du second horizon	33	40	39	37	50	58	60	0	43	60	57	58	47	45	77	50
Prof du troisième horizon	64	67	62	72	65	78	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0
Prof du quatrième horizon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% EG moyen	86,80	86,72	76,13	75,14	80,31	60,77	61,25	60,00	86,42	51,25	71,23	79,66	81,38	72,22	83,38	71
Profondeur moyenne	54	59	44	70	48	62	53	27	22	28	39	38	26	27	47	44
éléments grossiers affleurants	30	70	25	20	25	20	35	15	20	5	45	30	70	20	50	10
% Elément grossiers dans la fosse (P)	42,50	46,60	12,30	27,70	26,80	24,40	23,60	20,50	24,90	22,10	42,30	22,10	50,60	35,40	25,10	32,40
RU corrigé	46,40	47,58	58,41	76,35	52,70	69,85	60,97	32,20	24,78	32,72	33,75	44,17	19,41	25,78	52,58	45,02
résistivité électrique moyenne 0-1 m de profondeur			1163,92		519,05	599,73	227,20	664,31	571,85	324,58	581,92	3178,35	1407,79	1593,82	387,75	2450,00
résistivité électrique moyenne 1-5 m de profondeur			1606,46		617,98	439,36	325,74	274,16	309,27	959,98	530,41	1441,62	964,40	1409,53	430,15	668,78
résistivité électrique moyenne 5-20 m de profondeur			884,74		815,35	470,53	530,18	955,47	1284,17	586,24	1322,34	688,71	648,17	1568,64	725,18	470,09
Notation sanitaire 2007																
Niveau défoliation dominant (0-4)	3,00	4,50	2,00	2,86	1,08	1,53	3,20	3,77	2,87	1,56	2,00	3,00	3,50	2,25	2,77	2,44
dist à la combe	0	47,47	87,87	135,75	146,24	201,07	243,25	290,13	330,25	358,27	395,96	421,68	477,21	527,13	571,16	638,61
% def août 2007	42,00	11,88	60,83	45,00	78,85	63,00	27,78	28,85	42,11	66,67	59,58	31,25	29,17	40,63	18,46	49,44
std def	52,99	14,13	49,07	51,48	40,42	47,28	42,14	40,78	38,28	40,54	42,45	16,01	27,12	39,23	9,66	39,96
cv def	126,16	118,96	80,67	114,40	51,27	75,04	151,70	141,38	90,90	60,81	71,25	51,22	92,99	96,56	52,31	80,81
présence de gui	1,75	1,38	1,42	0,86	0,69	0,43	0,44	0,15	0,33	0,33	0,08	0,00	0,08	0,13	0,31	0,11
Notation sanitaire 2008 mais même arbre que 2007																
% CA	45,00	6,88	60,83	51,43	79,23	64,00	34,44	29,62	43,57	71,11	62,08	10,00	16,67	43,75	10,00	37,50
% MB	1,67	3,13	0,00	0,00	5,00	6,67	5,00	5,00	10,91	40,83	5,83	8,75	5,91	6,00	8,85	10,83
% DF 2008	44,00	12,50	67,50	48,57	78,85	64,67	28,89	30,00	36,07	70,00	57,50	18,75	20,83	46,25	18,46	41,25
l'indice GUI	2,00	1,50	1,17	1,00	0,69	0,40	0,56	0,10	0,11	0,33	0,00	0,00	0,25	0,13	0,38	0,25
Notation sanitaire 2008 mais avec nouveaux arbres																
% CA	28,50	6,88	53,50	38,50	63,75	57,40	30,00	37,19	39,38	65,33	55,36	20,00	15,26	42,27	10,29	27,50
% MB	1,88	3,13	1,50	0,71	5,00	6,25	5,00	5,45	9,23	33,89	6,25	11,67	5,83	5,71	10,88	9,69
% DF avec nrx arbres	27,00	12,50	52,75	35,50	64,00	57,80	25,45	37,50	31,88	68,33	52,14	23,89	44,55	20,59	30,28	30,28
Présence de GUI	1,80	1,50	1,44	1,00	0,94	0,59	0,55	0,09	0,09	0,33	0,00	0,00	0,42	0,18	0,41	0,11
% CA sans arbres secs	10,63	8,86	7,00	10,15	9,38	12,50	14,38	9,57	17,83	21,78	20,68	18,98	10,59	10,76	10,32	13,00
% DF sans arbres secs	8,75	10,51	5,50	7,73	10,00	11,25	11,35	10,10	15,34	37,11	20,71	21,84	12,65	12,69	20,15	21,56



URFM (UR 629) – Avignon Equipe «Ecologie Fonctionnelle et Dynamique des Communautés», Xie YINGGE & Sabrina Rachedi.	Protocole Teneur en eau du sol	Réf :RappMaster_SabrinaRachedi_v2_rqsPhD2.doc 36 / Erre Date : DD/10/YYYY
Dryade, vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques		
Courbe de rétention en eau du sol au Mont Ventoux		

OBJECTIF GENERAL

Déterminer la quantité d'eau retenue par le sol en lien avec les profils réalisés en tomographie (cf. annexe) et expliquer la variation du dépérissement entre les différentes placettes au Mont Ventoux.

NATURE DE L'OPERATION

Cette opération s'inscrit dans le programme Dryade qui sera mené sur 4 années par l'Unité de Recherche en Ecologie Forestière Méditerranéenne de l'INRA d'Avignon (dans l'équipe Ecologie Fonctionnelle et Dynamique des Communautés). Ce projet doit mettre en évidence l'effet des changements climatiques sur le dépérissement des sapinières en région méditerranéenne.

Cette opération consiste à mesurer la teneur en eau du sol au point de flétrissement permanent et à la capacité au champ. Les prélèvements ont été effectués dans les deux placettes en gradient altitudinal au Mont Ventoux. (DVX 2 et DVX 5)

CHOIX DE L ECHANTILLONNAGE

Prélèvement des échantillons de sol

Deux placettes en gradient altitudinal ont été retenues : la Dvx 2 et Dvx 5 qui correspondent aux placettes suivies intensivement dans le cadre du projet.

La Dvx2 se trouve dans la partie basse du gradient et la Dvx5 se trouve à l'extrémité haute du gradient. Les 2 placettes sont composées majoritairement par des sapins.

Les endroits d'ouverture de fosses ont été faits suite à la réalisation de profil de résistivité selon plusieurs transects (cf. protocole Tomographie-EMMAH)

En DVX 2:

Selon les profils donnés par le résistivimètre, trois fosses ont été ouvertes (fin avril - début mai) afin de prélever des échantillons de sol. 12 échantillons ont ainsi été prélevés à différentes profondeurs selon le type de profil rencontré (plus ou moins conducteur) :

pour H1- 0-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70 et 70-80

H2- 40-60, 60-80. (0-20 non fait suite à la présence des cailloux ou litière)

H3- 0-20, 20-40, 40-60.

NB: (H = Fosse)

Le découpage est à priori arbitraire tous les 10 ou 20 cm et ne se rattache pas à un horizon pédologique au sens strict .

En DVX 5

Trois fosses ont été ouvertes (Fin mai - début juin) afin de prélever le sol. Les 13 échantillons de sol ont été prélevés à différentes profondeurs:

pour H1- 0-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70 , 70-80 et 80-100

H2- 0-20, 20-40, 40-60, 60-80.

H3- 0-20, 20-40, 40-60, 60-80.

PLAN EXPÉRIMENTAL

Sur le Terrain

Sur chacun des horizons ainsi délimités, il s'agit d'estimer le volume d'éléments grossiers et de prélever de la terre fine pour une analyse ultérieure en laboratoire. Il faut donc séparer la terre fine des éléments grossiers.

Parmi les éléments grossiers, il faut distinguer les éléments dont la taille est supérieure à **10 cm** de celle inférieure à **10 cm**. Le volume d'éléments grossiers est ensuite estimé par la détermination de la quantité d'eau déplacée par ce volume d'éléments grossiers.

Pour la terre fine, seule la terre fine inférieure à **8 mm** est récupérée sur le terrain par tamisage pour une analyse ultérieure en laboratoire (cf. § ci-dessous). Les sachets de terres fines sont repérés selon le code du § 2.1.

Au Laboratoire: préparation des échantillons et méthodes pour la détermination de la courbe de rétention en eau

Préparation des échantillons

1. Mettre les prélèvements de sol à l'étuve, 3-4 jours à une température de 40°C pour le séchage.
2. Tamiser le sol dans le tamis à 2 mm (avec la machine du labo sol),
3. Préparer des échantillons de 200g par niveau pour les analyses.
4. Mettre les échantillons de sol dans des enveloppes prévues à cet effet.
5. Mettre des étiquettes sur lesquelles ont note le code de l'unité demandeuse (cf. tampon) et le numéro de l'échantillon (codé de 1 à n). La correspondance entre ce numéro et le niveau de l'horizon prélevé sur le terrain est répertorié dans le cahier de labo tenu par Sabrina (cf. Fichier mesures du sol)
6. *Remplir une fiche avec les codes des analyses à demander au laboratoire d'analyse (ARRAS) pour chacun des échantillons.*

Courbe de rétention en eau

Afin de tracer la courbe de rétention en eau, on utilise la chambre à pression de RICHARDS (1941), en utilisant des plaques en céramique.



photo n° 1 : Chambre à pression de RICHARDS du laboratoire sol de l'unité EMMAH (INRA Avignon) et plaque en céramique



Photo n° 2 : Mise en saturation des plaques

La paillasse étant occupée par d'autres (Mr. SERAY EDDINE), on ne peut utiliser que trois chambres à pression.

Les pressions à exercer sont (0,1-0,3-0,5-1-3-4-8-12-15) Bars, correspondant aux pF compris (2 et 4,2) pour avoir la teneur en eau à la capacité au champ (pF 2) et au point de flétrissement permanent (pF 4,2).

1. Mettre 3 plaques à 1 bars à saturation pendant 3 jours, l'eau de saturation doit être déminéralisée (cf. photo n°2, la saturation est atteinte lorsque tous les pores des plaques sont remplis d'eau).
2. Prendre 3 anneaux pour chaque échantillon (3x12) soit trois répétitions par échantillon de sol (cf. photo n°3).
3. Mettre les 36 anneaux sur la plaque, en mettant des étiquettes sur les échantillons (fig. 1)



Photo n° 3 : Mise des échantillons sur les plaques saturées.

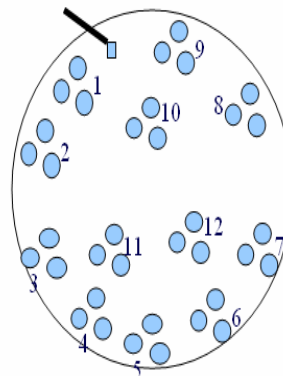


Fig.1. Répartition des échantillons sur la plaque de la chambre à pression.



Photo n° 4 : Mise de la plaque dans la chambre

1. Mettre la plaque dans la chambre à pression (photo n°4),
2. Connecter le capillaire de la plaque à celui de la chambre, pour l'évacuation de l'eau (photo n°5).



Photo n°5 : Connexion du capillaire pour l'évacuation de l'eau



Photo n°6 : Fermeture de la chambre avec les boulons



Photo n°7 : ouverture du robinet à pression

3. Mettre de l'eau déminéralisée sur la plaque pour saturer les échantillons.
4. Laisser les échantillons s'imbiber pendant 2 heures (voir plus en fonction du type de sol)
5. Une fois les échantillons bien imbibés, fermer la chambre, veiller à bien remettre les boulons de manière à ne pas avoir de fuite d'air une fois la pression exercée (photo n°6).
6. Ouvrir le robinet d'arrêt de la pression.
7. Ouvrir le robinet de chaque chambre au maximum puis le robinet d'arrêt de chaque chambre à pression (photo n°7).
8. Régler le robinet pour obtenir la stabilisation de la pression souhaitée (0,1-0,3-0,5-1-3-4-8-10-15 Bars),
9. Vérifier qu'il n'y a pas de fuite, en mettant le capillaire sortant de la chambre dans une éprouvette remplie d'eau. La présence de bulle d'air indique une fuite. .
10. Verser l'eau évacuée dès la mise en marche de la pression au fur et à mesure que les récipients se remplissent.
11. Laisser 3-4 jours jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau à évacuer.
12. Récupérer les échantillons dans de petites boîtes déjà tarées (photo n°8).



Photo n°8 : récupération des échantillons dans des boîtes déjà tarées



Photo n°9 : Pesée des échantillons

13. Peser les boîtes et noter le poids humide de chaque échantillon pour chaque pression (les 36 échantillons pour chaque pression) (photo n°9)
14. Ouvrir les boîtes et les mettre dans des plateaux pour les sécher à l'étuve à une température de 105°C, laisser minimum 24 h.
15. retirer les boîtes de l'étuve, les refermer le plus vite possible pour éviter que les échantillons ne prennent l'humidité de l'air.
16. Mettre les boîtes dans un récipient en verre pour qu'elles refroidissent avant de les peser.
17. Repeser les boîtes à la sortie de l'étuve, pour avoir le poids sec.
18. Faire la moyenne des 3 échantillons des données de poids sec et humide,
19. Faire la différence entre le poids sec et humide pour obtenir la masse d'eau (g),
20. Calculer le volume des anneaux contenant le sol pour estimer le volume de la terre et pour obtenir la densité de l'échantillon puis calculer la masse volumique du sol.
21. Faire la courbe de la teneur en eau du sol en fonction des pressions exercées.

Annexe 3

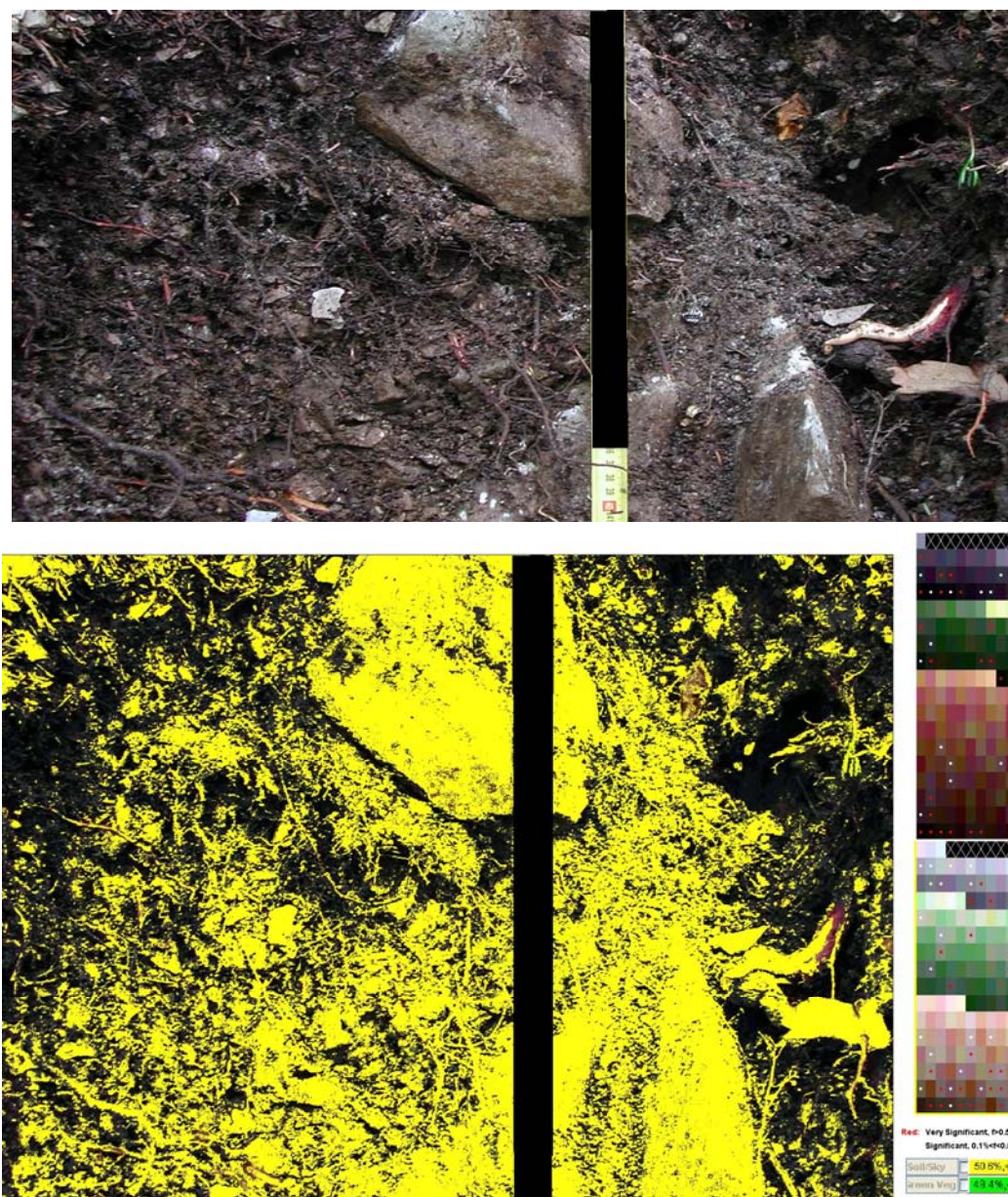


Fig.14. Détermination du pourcentage d'éléments grossiers par analyse photographique

L'utilisation du logiciel de photointerprétation CanEye³ a permis de déterminer le pourcentage d'éléments grossiers, sur la base de la différenciation des couleurs. En pointant les zones qui nous semblent correspondre à des éléments grossiers, le logiciel mémorise la couleur pointée, la définit en tant qu'éléments grossiers et considère que les pixels de même couleur sont eux aussi des éléments grossiers. Le pourcentage d'éléments grossiers correspond au pourcentage de coloration en jaune, les taches noires correspondent à la terre fine et à la matière organique.

³ http://www.avignon.inra.fr/can_eye/

Annexe 4

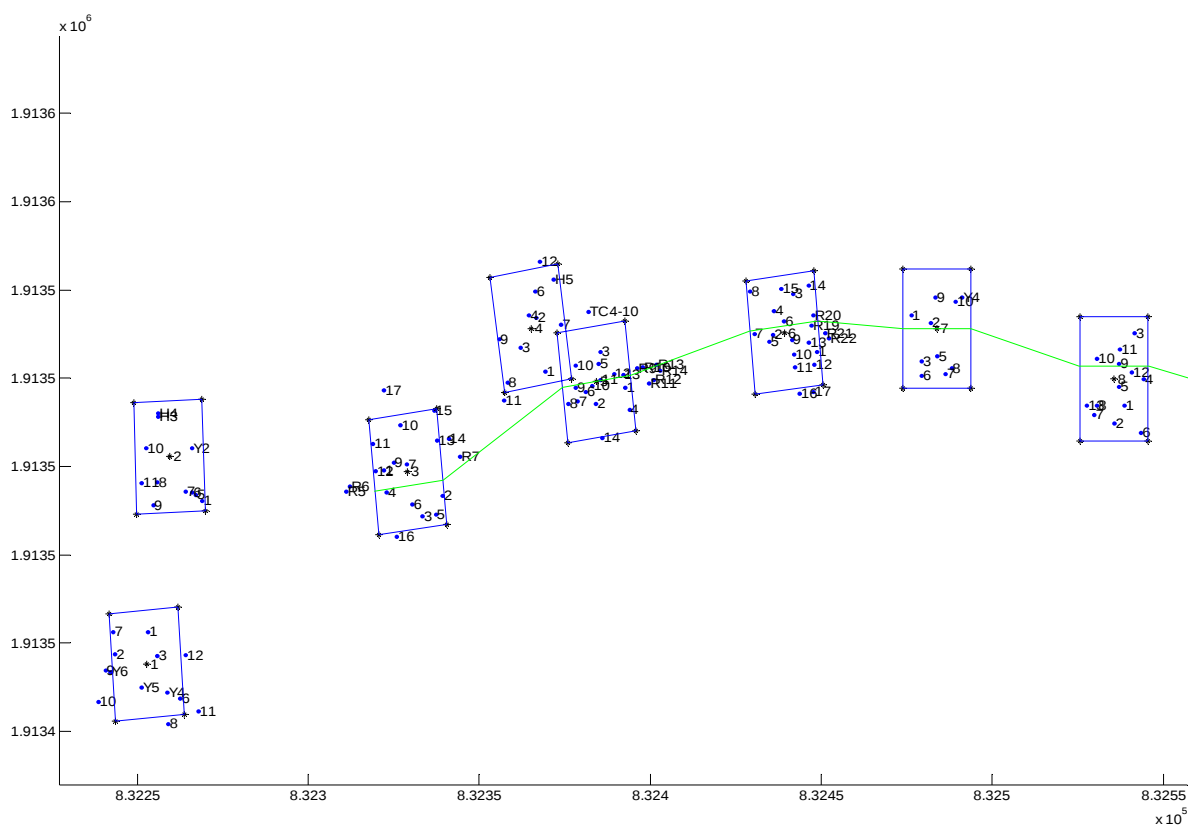


Fig. 15 Localisation des arbres suivis dans les placettes (TC 1- 9) sur le profil tomographique

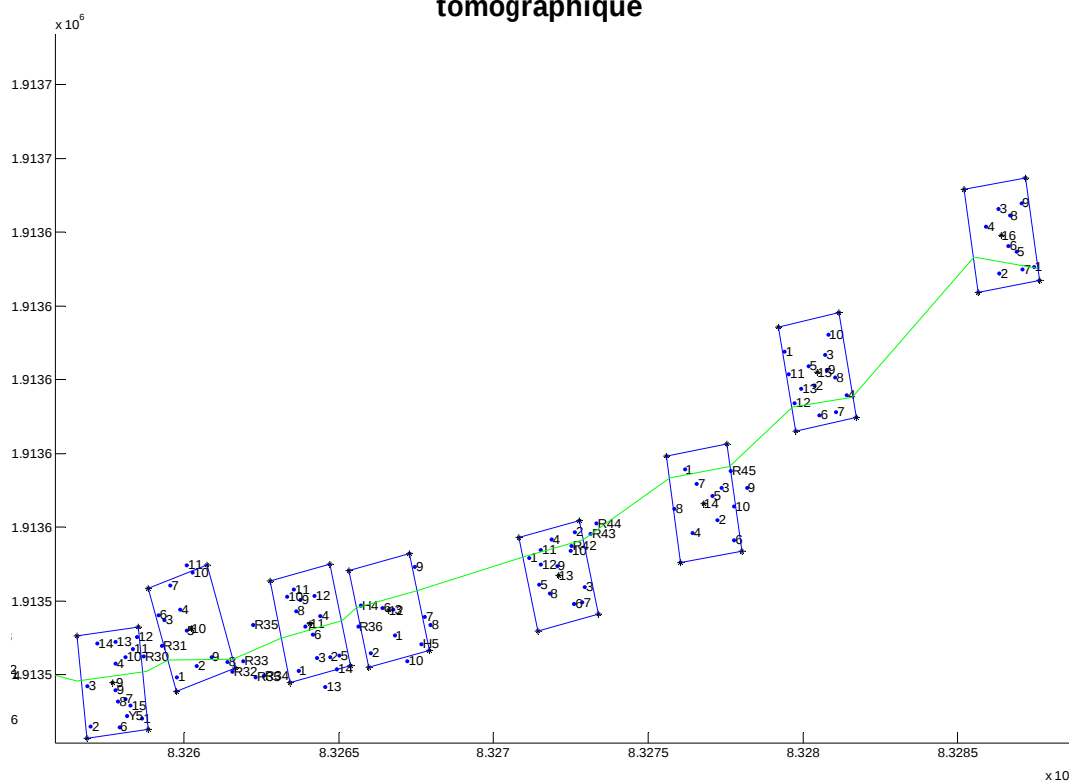


Fig. 16. Localisation des arbres suivis dans les placettes (TC10-16) sur le profil tomographique.

Annexe 5



Mode Opérateur Élémentaire *Caractérisation sanitaire*

Réf.: CPF-MO_Caractérisation
sanitaire
Version 1
date : DD/10/YY
page : 43 / 59

Caractérisation sanitaire du sapin pectiné

Objectif

L'objectif de ce mode opératoire est d'évaluer la « santé » des forêts, et éventuellement de la suivre au cours du temps.

Pour ce faire, les observations portent à la fois sur des symptômes jugés anormaux par rapport à un arbre estimé en bonne santé (coloration anormale, mortalité de branches, chancre sur tronc...) et sur la présence de causes de dommages (champignons, insectes...) susceptibles d'altérer la santé de l'arbre.

Après une observation détaillée de l'arbre, une notation du déficit foliaire est réalisée. Ce critère est admis comme un critère intégrateur de l'état de santé de l'arbre et doit prendre en compte l'ensemble des observations préalablement effectuées (symptômes et causes). Elle est réalisée par rapport à un arbre de référence à déficit foliaire nul (voir plus loin).

Ce mode opératoire est un « résumé » du Manuel de Notation des dommages forestiers du Département de la Santé des Forêts, adapté pour le sapin pectiné. Donc pour plus de précisions sur certains points, s'y référer.

Conditions d'observation

Les arbres-échantillons doivent être observés avec des **jumelles** depuis plusieurs points d'observation (au minimum deux), si possible en **vision horizontale** du houppier depuis l'Amont (nos placettes étant généralement en pente)

Les observations sont réalisées en pleine lumière du jour en évitant les heures trop tardives (ou trop précoces) au cours desquelles la lumière est modifiée (dominante rouge ou bleue) et ne permet pas des observations correctes de certains critères (coloration anormale notamment).

Le houppier notable

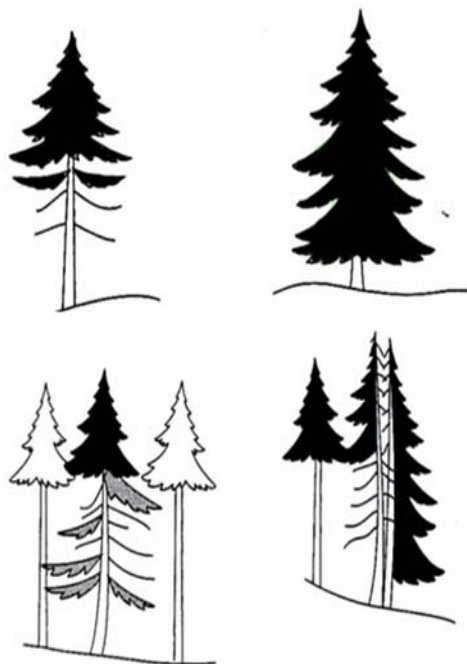
Pour tous les critères qui sont observés dans le houppier, la quantification dépend énormément de la zone de notation. L'objectif des suivis étant axé sur la santé des arbres, les symptômes liés à des phénomènes naturels, phénologiques, normaux au cours du développement d'une tige ne sont pas à prendre en compte comme signes d'un dysfonctionnement.

C'est pourquoi les parties de la couronne directement influencées par des phénomènes de concurrence ou de compétition intra-arbre (partie inférieure du houppier) ou inter-arbres (interactions entre tiges voisines) sont exclues lors de l'évaluation quantitative d'un critère dans le houppier.

On nomme la partie où est effectuée l'évaluation quantitative d'un critère dans le houppier : « **houppier notable** ».

Le houppier notable est la partie supérieure du houppier, « à la lumière », excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence.

Pour un arbre isolé en croissance libre depuis longtemps, le houppier notable correspond à la totalité du houppier. En peuplement, la proportion du houppier composant le houppier notable va dépendre de la densité des tiges.



*Figure 1 : Houppier notable (zone noircie)
en fonction de la densité du peuplement*

Dans le cas particulier d'une descente de cime, cette partie morte doit intégrer le houppier notable.

Démarche d'observation d'un arbre-échantillon

Le principe général d'observation est de « **noter ce qu'on voit** » uniquement.

La démarche d'observation des arbres-échantillons est la suivante :

- 1) évaluation de la **coloration anormale**
- 2) évaluation de la **mortalité de branche**
- 3) notation du **déficit foliaire** par rapport à un arbre de référence
- 4) observation de **causes de dommages** liés à des symptômes autres que mortalité de branches et coloration anormale.

La coloration anormale

Définition : Il s'agit d'une coloration du feuillage jugée anormale par rapport à la coloration normale et habituelle du feuillage vivant (couleur verte en générale) de l'essence observée en période de végétation.

Par convention, du fait de la difficulté à apprécier la réelle fonctionnalité de feuilles qui progressivement passent du vert au jaune puis au brun-rouge et finissent par tomber (par exemple en cas de canicule ou d'attaques fongiques), **les feuilles (totalement ou partiellement) desséchées ou nécrosées présentes sur l'arbre sont prises en compte dans la coloration anormale et pas dans le déficit foliaire.**

Les paramètres de caractérisation de la coloration anormale sont les suivants :

a) Type d'Aiguille

AN ou FN : Aiguilles ou feuilles de l'année

AV ou FV : Aiguilles ou feuilles anciennes

AT ou FT : Aiguilles ou feuilles de tous âges

b) Type de coloration

Coloration vert clair à jaune	JAUN
Rougisement à brunissement (incluant les nécroses)	ROUG
Coloration grisâtre	GRIS
Autres couleurs	COUL

Une précision sur la répartition de cette coloration anormale sur le feuillage est donnée en complément :

Partout	TOT
bord du limbe	BOR
extrémité, apex	EXT
Partiel	PAR

c) La localisation.

Par rapport à l'ensemble du houppier

H : partie haute (moitié supérieure)

B: partie basse (moitié inférieure)

D: disséminé, diffus,...

T: totalité

d) La cause ou le symptôme

Le manuel DSF prétend : « Le **diagnostic** doit être **le plus précis possible**, en évitant cependant **les prélèvements destructifs** sur les arbres-échantillons des placettes. En cas d'**absence de diagnostic**, c'est le **symptôme** qui sera **décrit et évalué** ».

Dans notre cas, il est assez difficile de connaître la cause de tel ou tel symptôme

Un échantillon pourra être éventuellement prélevé (sur des arbres de même essence ayant les mêmes symptômes dans le voisinage immédiat des arbres-échantillons de la placette)

e) Note

Une note de **quantification** de la coloration anormale par rapport à l'ensemble du feuillage du houppier notable.

symptôme par zones

A=50 %H atteint à 10 %

B=25 %H atteint à 30 %

C=25 %H atteint à 20 %

NOTE GLOBALE=

$0,50 \times 10 + 0,25 \times 30 + 0,25 \times 20$

$= 5 + 7,5 + 5 = 17,5 = 20$

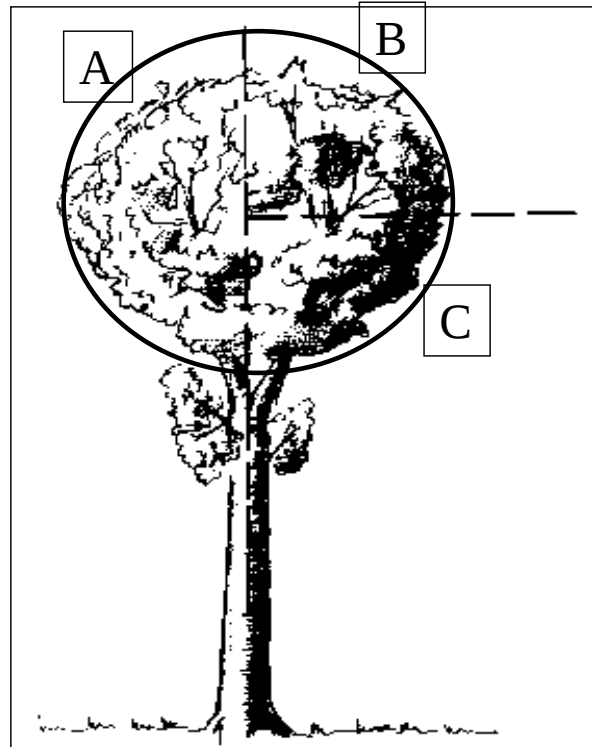


Figure 2 : Principe de l'élaboration de la note d'intensité du symptôme

Pour quantifier cette coloration anormale, l'arbre est découpé en zones d'intensité d'endommagement homogène. On caractérise pour chaque zone le pourcentage du houppier qu'elle représente et l'intensité du dommage. La note globale étant calculée en additionnant les notes de chaque zone pondérées par la taille de la zone par rapport au houppier total.

La note d'intensité varie de 0 à 100 en classe de 5 %

Les notes 5 et 10 correspondent à des « traces », les notes 20 à 30 à une intensité légère, les notes 40 à 50 à une intensité moyenne, les notes 60 à 70 à une intensité forte et les notes 80 à 90 à une intensité très forte. Enfin, la note 100 correspond au fait que la (quasi) totalité de la partie notée de l'arbre est affectée.

Lorsqu'il n'y a pas de coloration anormale, on note « **N** » ou « **non** » ou **0**, de façon à bien signaler qu'il ne s'agit pas d'un oubli de renseignement mais bien d'une observation négative.

La mortalité de branches

Dans l'impossibilité de pouvoir vérifier effectivement depuis le sol si les tissus d'une branche sont réellement morts, la mortalité d'une branche sera appréciée par un ensemble de symptômes observables aux jumelles depuis le sol :

- Absence de feuilles ou aiguilles en période de végétation
- Absence de bourgeons à l'extrémité des rameaux
- Absence de pousses fines terminales ou latérales

Nota : **une branche cassée n'est pas une branche morte**. Elle est considérée comme absente et le cas échéant doit être notée l'année du dommage en causes de dommages ou symptômes.

Les paramètres de caractérisation de la mortalité de branches sont les suivants :

a) le type de branches :

PN	=	Pousses de l'année
PA	=	Pousses terminales, apicales
BP	=	Petites branches, rameaux, diamètre < 2 cm
BM	=	Branches moyennes, diamètre < 10 cm
BG	=	Grosses branches, diamètre $\geq$ 10 cm
BV	=	Branches de dimension, diamètre variable

b) la localisation

- H** : partie haute (moitié supérieure)
- B** : partie basse (moitié inférieure)
- D** : disséminé, diffus,...
- T** : totalité

c) la cause

Lorsque c'est possible, définir la cause de cette mortalité.

d) note

Une **note d'importance** de la mortalité de branche par rapport à l'ensemble des branches du houppier notable. Calcul selon le même principe que la note de coloration anormale

La note d'intensité varie de 0 à 100 en classe de **5 %**

Déficit foliaire

Définition :

Le déficit foliaire est un déficit de surface foliaire correspondant à un manque de feuilles ou d'aiguilles (tout ou partie) et/ou à des dimensions de feuilles ou aiguilles anormalement

petites par rapport au houppier d'un arbre de même essence, au même stade de développement et placé dans les mêmes conditions de concurrence, *dit arbre de référence*.

Le déficit foliaire se traduit par :

- une absence de feuilles ou d'aiguilles due :
 - à leur chute
 - à la chute de rameaux
 - à une réduction de croissance entraînant une réduction de la ramification
 - au dessèchement ou à un bris récent de branches ou de rameaux
- une réduction de la surface foliaire individuelle, due au phénomène de microphyllie ou à l'impact d'insectes phyllophages ou de maladies foliaires.

Notes :

Le déficit foliaire est quantifié dans le houppier notable **uniquement**

C'est une note intégratrice de toutes les observations préalables réalisées auparavant sur les éventuels causes de dommages. Elle est à réaliser en dernier dans le processus de notation d'un arbre-échantillon. Elle prend en compte en plus le manque de feuilles, de ramifications ou de branches sans cause apparente, manque estimé par rapport à un arbre de référence.

Par convention, les feuilles nécrosées ou desséchées encore présentes sur l'arbre au moment de la notation ne sont pas prises en compte dans le déficit foliaire même s'il est vraisemblable qu'elles ne soient plus fonctionnelles. Elles seront notées par contre en coloration anormale.

Les classes de notation

Le déficit foliaire est apprécié en classe d'amplitude 5 % selon la définition suivante :

Note 0 = 0 % de déficit foliaire

Note 5 = 1 à 5 % ; Note 10 = 6 à 10 % ; Note 90 = 86 à 90 % ; Note 95 = 91 à 95 %

Note 100 = 96 à 100 % c'est à dire que l'arbre peut avoir son houppier notable sans feuille mais il est encore vivant.

Sec = arbre totalement mort

La procédure de note de défoliation est la même : Découpage du houppier notable en zones homogènes - Estimation des pertes par zones, par rapport à l'arbre de référence - Faire la moyenne pondérée par zone et définir la note globale

Nombre d'années d'aiguilles :

Le comptage du nombre de générations d'aiguilles est utile, même s'il est problématique. Il permet en effet de mettre en évidence l'absence éventuelle d'aiguilles et d'aider à l'évaluation du déficit foliaire.

Sur le Ventoux, le sapin « normal » a 9 années d'aiguilles (jusqu'à 11).

Nous pouvons considérer que le nombre des aiguilles de 7, 8, et 9 ans est « naturellement » faible.

Ainsi nous devons prendre en compte ce manque d'années d'aiguilles lorsqu'il y a 6 années d'aiguilles et moins.

La microphyllie :

La microphyllie qualifie des dimensions anormalement petites des feuilles ou des aiguilles qui induisent une réduction substantielle de surface foliaire.

Elle est mise en évidence fréquemment par une transparence inhabituelle du houppier alors qu'on estime que toutes les feuilles sont présentes.

Elle est souvent associée à des événements phénologiques (fructification abondante par exemple) ou climatiques (sécheresse durable...) sans que la liaison de cause à effet soit cependant très formelle.

C'est pourquoi elle sera signalée et codée par le code **MICROPH** comme symptôme.

Elle est donc à signaler et à prendre en compte dans la note de déficit foliaire quand le notateur estime qu'elle est flagrante, sans cependant qu'on puisse fixer un seuil quantitatif. Cependant pour éviter les confusions entre microphyllie et la variabilité naturelle des feuilles ou aiguilles intra-arbre et inter-arbres, il est suggéré de prendre en compte la microphyllie lorsqu'on estime que les feuilles sont environ deux fois plus petites que la normale en surface c'est à dire plus petite d'un tiers en longueur.

Notion d'arbre(s) étalon(s)

Un arbre étalon est un arbre présent sur la placette au moment de la notation, qui est observé avec une attention particulière par rapport à l'arbre de référence ou à sa description détaillée (car il peut ne plus être présent à proximité immédiate de la placette). Les notations des arbres échantillons seront alors effectuées en référence à cet (ou ces) arbre(s)-étalon(s).

La démarche à tenir lors la notation, sur la placette, est la suivante :

- repérer, parmi les arbres à noter, celui qui se rapproche le plus de la description de l'arbre de référence ;
- délimiter son houppier notable ;
- examiner sa ramification ;
- voir la taille des feuilles ou des aiguilles ;
- sur résineux, procéder, si possible au comptage des générations d'aiguilles, quantifier l'importance de chaque année par rapport à l'ensemble ;
- compléter par d'autres critères propres (coloration anormale, floraison,...) ;
- examiner son environnement et définir les limites de son houppier ;
- le comparer à la description de l'arbre de référence.

Deux possibilités :

- c'est l'arbre de référence (0 % de déficit foliaire et catégorie 0 de coloration anormale).

- ce n'est pas l'arbre de référence, dans ce cas le noter par rapport à la description de l'arbre de référence. Cet arbre devient "l'arbre étalon" qui servira de base à la notation des autres arbres.

Cette façon de procéder permet :

- de s'étalonner en début de notation ;
- de régler les différences d'appréciation entre notateurs ;
- d'éviter de se laisser trop influencer par une partie (très) défoliée du houppier.

Cette opération répétée pour chaque essence et sur plusieurs arbres de la placette d'aspect différent, offre la possibilité de noter plus rapidement les arbres restants.

Circonférence

Au Regulex, prise de la circonférence à 130cm : trait rouge sur le tronc. *Cf mode opératoire*

Hauteur

Prise de la hauteur totale de l'arbre à l'aide d'un Vertex. *Cf mode opératoire*

Mesure aussi de la hauteur de la base du houppier vert afin de déterminer la taille du houppier vivant. 2 mesures sont nécessaires : une à l'aval et une à l'amont pour prendre en compte la pente.

Statut social

Lors de la campagne 2007, le statut social de chaque sapin a été noté : Dominant ou Codominant, même si la distinction entre ces 2 classes reste subjective.

Taille houppier notable

Au lieu d'indiquer le statut social de l'arbre, une autre observation permettrait d'estimer sa « dominance » : la taille du houppier notable.

De plus, on peut remarquer dans la plupart des cas que, plus le houppier notable est petit, plus la note de défoliation ou de coloration anormale est basse. En effet si on note que le 1^{er} voire les 2 premiers mètres, nous visionnons seulement les parties les plus jeunes de l'arbre où il y a donc moins de risques de coloration anormale, de défoliation...

Cette mesure du houppier notable sert donc à « modérer » la note de défoliation.

A la fin de la campagne 2007, sur certaines parcelles, une estimation visuelle de cette taille de houppier notable a été réalisée ; lors des campagnes suivantes, il serait plus judicieux de le mesurer à l'aide du Vertex...

Etat sanitaire du tronc

Une vérification de l'état sanitaire du tronc est indispensable :

- 5- Présence ou non de scolytes (arbres morts et dépérissants, rarement sains).
Caractérisation de l'espèce en question... (J-N Candau)
- 6- Coulées de résine.
- 7- Présence ou non de longicornes

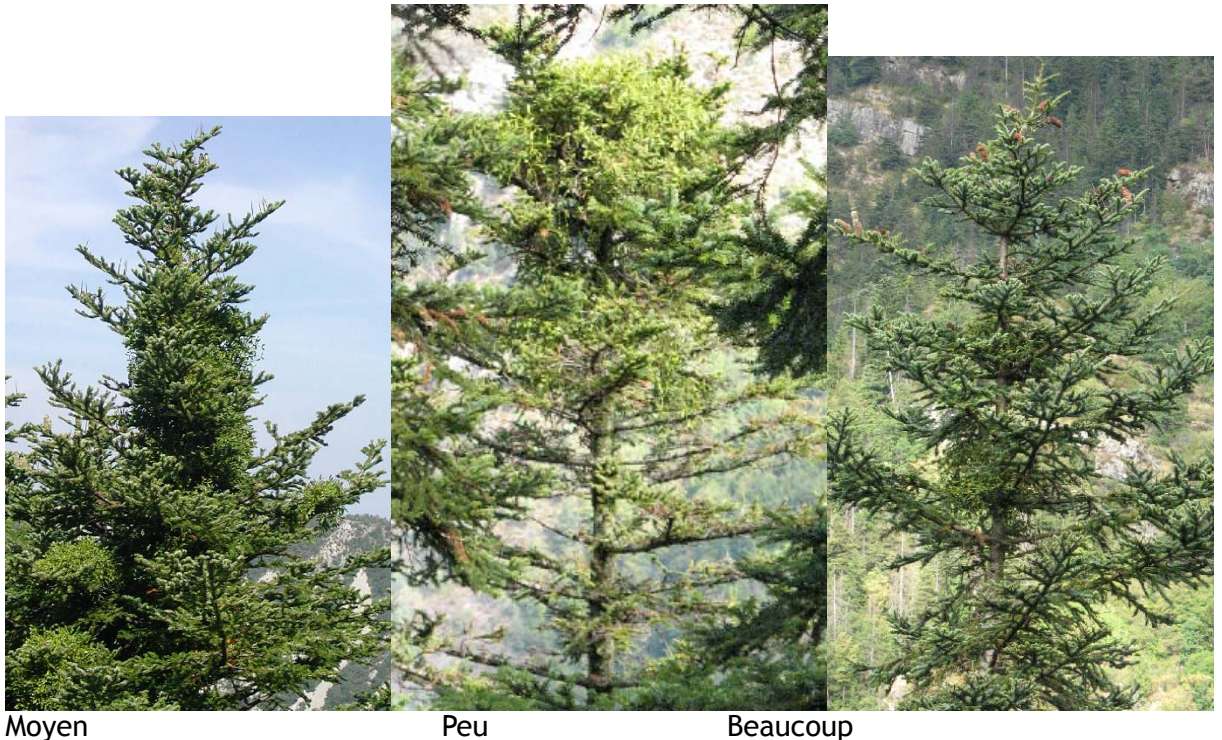
- 8- Présence de trous creusés par les pics
- 9- Ecorcé ou non.
- 10- Présence de champignon
- 11- Blessure en bas du tronc (souvent dans le cas des parcelles à forte pente) ...



Gui

La présence de cet hémiparasite est notée et classée selon 4 classes :

- 12- non : Pas de gui
- 13- Peu : Houppier peu infesté
- 14- Moyen : présence de quelques grosses « boules » de gui, ou de nombreuses petites.
- 15- Beaucoup : Très infesté



Nombre de cônes

Le nombre de cônes de chaque sapin est compté aux jumelles

Le nombre de cônes avortés doit aussi être comptabilisé. Ainsi, en additionnant le nombre de cônes « murs » et les avortés, on se rapproche plus du nombre de bourgeons reproductifs mis en place au cours de l'été passé. (Influencé favorablement par une sécheresse)

Annexe 1 : Arbre de référence

Il n'existe pas d'arbre de référence type au niveau national. En effet, un sapin des Hautes Vosges n'a pas du tout le même aspect qu'un sapin de l'Aude.

Ainsi, doit être considéré comme arbre de référence, l'arbre que les gestionnaires forestiers locaux (et pas seulement l'équipe de notateurs) estiment être un arbre normal dans les conditions stationnelles, climatiques et sylvicoles moyennes du massif.

Cet arbre est considéré comme noté à 0% de déficit foliaire et classe 0 de coloration anormale.



Figure 2 : *Sapin considéré comme référence sur le Ventoux* Sapin jeune à adulte ; houppier conique ; long houppier notable.

Aucune coloration anormale : 0 % (le peu de taches rouges visibles sont dues à la présence des chatons mâles)

Aucune branche morte

Pas de défoliation : feuillage dense, 8 à 9 années d'aiguilles...

Annexe 2 : Exemple de notation d'un Sapin (manuel DSF) :

Défoliation par zones homogènes

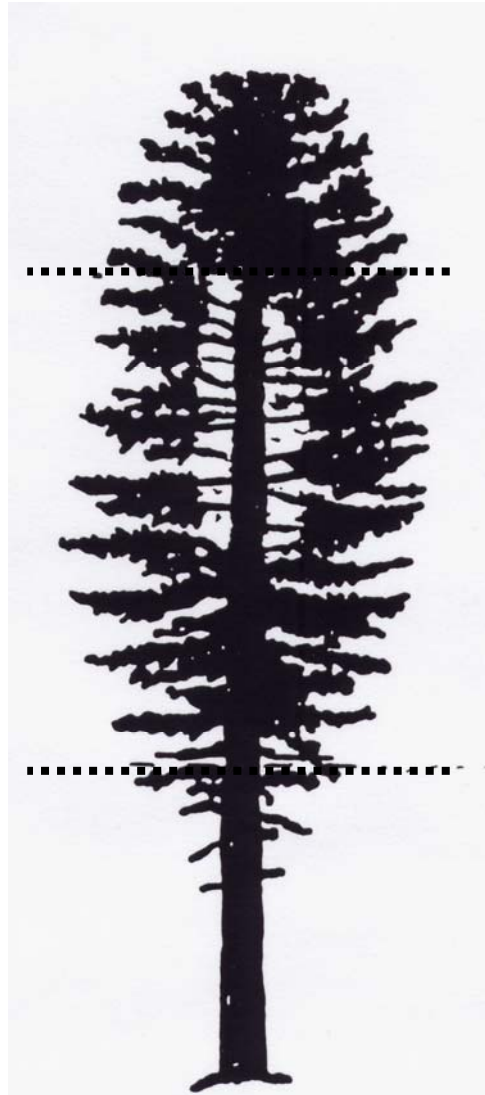
Taille des aiguilles normale

1/3 supérieur

8 générations complètes
déficit foliaire = 0 %

2/3 inférieur

3 générations complètes
(n, n-1, n-2)
déficit foliaire = 0 %
1 génération incomplète
(n-3 à 50 %)
déficit foliaire = 5 %



Pour l'ensemble du houppier: $0 + 2 \times (0 + 5 + 10) = 30$
Pour 300 % = 30, donc pour 100 % = 10

Mis à jour le 13-09-07

Maxime Cailleret

Annexe 6 : Note de caractérisation sanitaire en fonction des classes de circonférence et de hauteur.

classe de circonférence	%DEF	NoteT	NoteCA	NoteDF	Note sec	Nbr. Arbres
0	31,8292683	1,51219512	1,53658537	1,51219512	0,24390244	41
1	36,7741935	1,69354839	1,72580645	1,64516129	0,29032258	62
2	45,8510638	2,12765957	1,9787234	2,14893617	0,36170213	47
3	48,7209302	2,18604651	2,09302326	2,3255814	0,34883721	43
4	34,1463415	1,95121951	1,53658537	1,92682927	0,14634146	41
	0,2082	0,2216	0,3801	0,0708	0,1684	234
classe de hauteur	%DEF	NoteT	NoteCA	NoteDF		Nbr. Arbres
0	23,8095238	1,23809524	1,19047619	1,23809524		21
1	34,4827586	1,5862069	1,75862069	1,5862069		31
2	40,1470588	1,94117647	1,79411765	1,85294118		34
3	53,5294118	2,41176471	2,23529412	2,5		34
4	38,0645161	1,96774194	1,83870968	1,96774194		31
	0,0978	0,0881	0,2551	0,0384		151

P: Coefficient de significativité

Note CA: Note de la coloration anormale

Note DF: Note de la défoliation

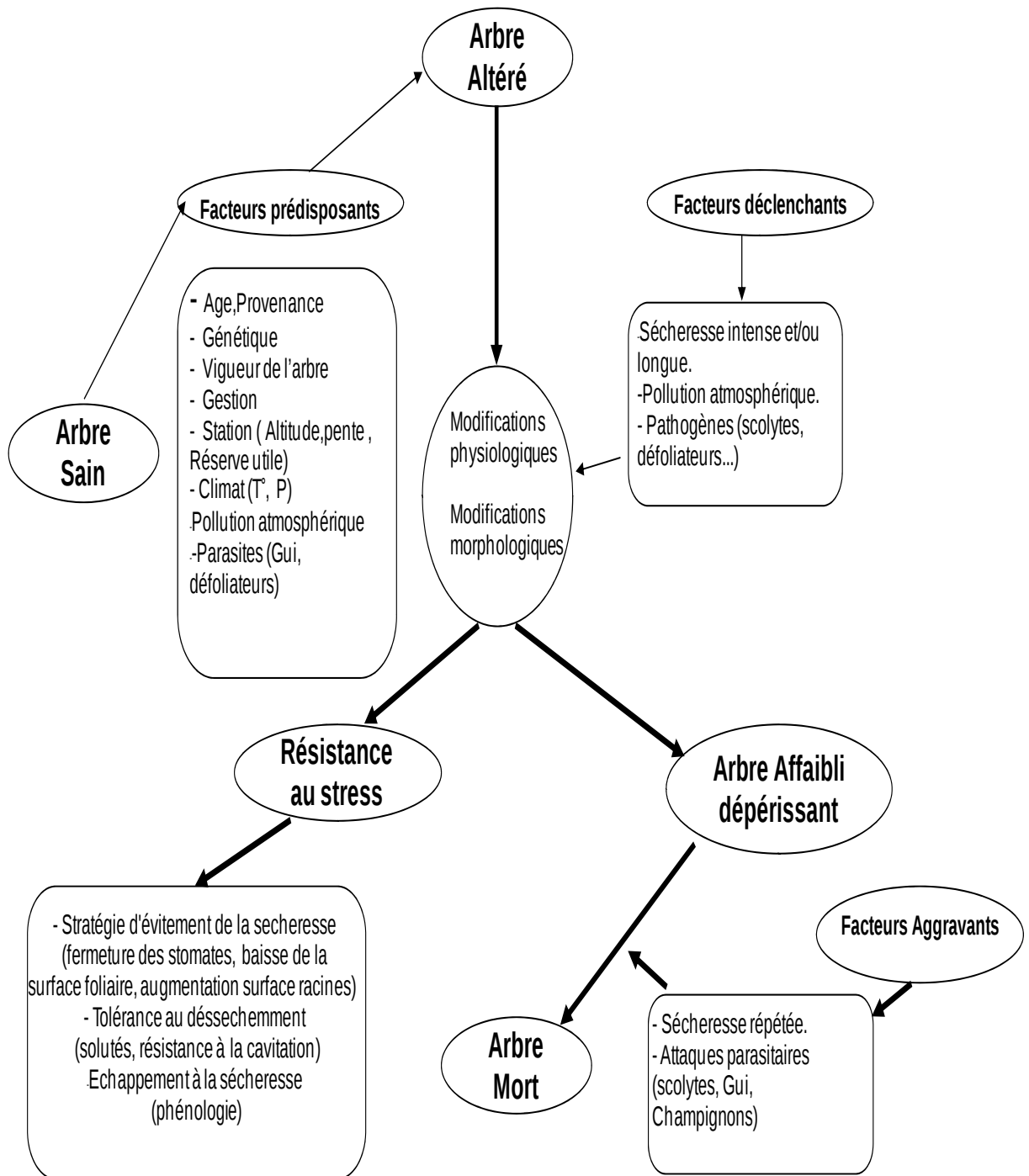


Fig.1. Schémas des différents facteurs du dépérissement (d'après Mattson et al.1987; Abdenbi Z.A., 2003 amélioré)

