

# Recherche de relations entre stations forestières et état sanitaire du pin maritime en Provence en rapport avec la cochenille *Matsucoccus feytaudi*

par Michel VENNETIER, Christian RIPERT et Olivier CHANDIOUX

**Dans les Maures, certains pins maritimes ont survécu à l'épidémie liée à *Matsucoccus*.**

**Dans cet article, les auteurs proposent de vérifier s'il existe une résistance partielle de certaines provenances locales du pin maritime à la cochenille, induite par les caractéristiques stationnelles. Pour cela, un réseau de placettes a été installé en Provence cristalline, mais aussi en Provence calcaire.**

## Introduction

### Contexte et objectifs du programme

Le dépérissement du pin maritime en Provence cristalline (CARLES, 1974), lié à la cochenille *Matsucoccus feytaudi* (duc) (DUCASSE, 1942) a touché tous les massifs forestiers de cette région. Aucun traitement sylvicole ni chimique n'a pu arrêter cette épidémie (SCHVESTER *et al*, 1970, ABGRALL *et al*, 1990). Toutefois, des arbres avaient localement survécu à cette épidémie. Leur situation dispersée, leur nombre limité et le manque d'étude détaillée sur le sujet ne permettaient pas de conclure sur l'origine de leur résistance : génétique, liée au milieu, ou anecdotique. Aucune provenance locale n'ayant montré une résistance suffisante à court ou moyen terme dans les essais comparatifs situés dans le massif des Maures (SCHVESTER et UGHETTO, 1986), l'introduction de provenances étrangères résistantes à la cochenille (SCHVESTER, 1982) a été envisagée pour reconstituer une partie au moins des peuplements. Avant d'introduire massivement ces provenances étrangères, dont l'adaptation à long terme n'est pas garantie, et qui peuvent s'hybrider avec les provenances locales, il apparaissait utile de vérifier si, dans certaines situations au moins, les conditions stationnelles (climat, sol, exposition...) ne permettaient pas la survie et le développement des provenances locales.

A la suite de la publication par le Cemagref du catalogue des stations forestières de la Provence cristalline (LADIER et RIPERT, 1996), le Département Santé des forêts du ministère de l'Agriculture a demandé à cet organisme une étude portant sur les relations entre les conditions stationnelles et le dépérissement du pin maritime. Le programme réalisé en 1998 comprenait deux objectifs :

- l'analyse des conditions stationnelles des arbres ayant survécu à la première épidémie,
- la recherche d'éventuels sites de résistance dans les jeunes peuplements issus de la régénération des arbres morts ou coupés dans les années 60 à 80.

## Méthode

### Recherche des arbres et peuplements

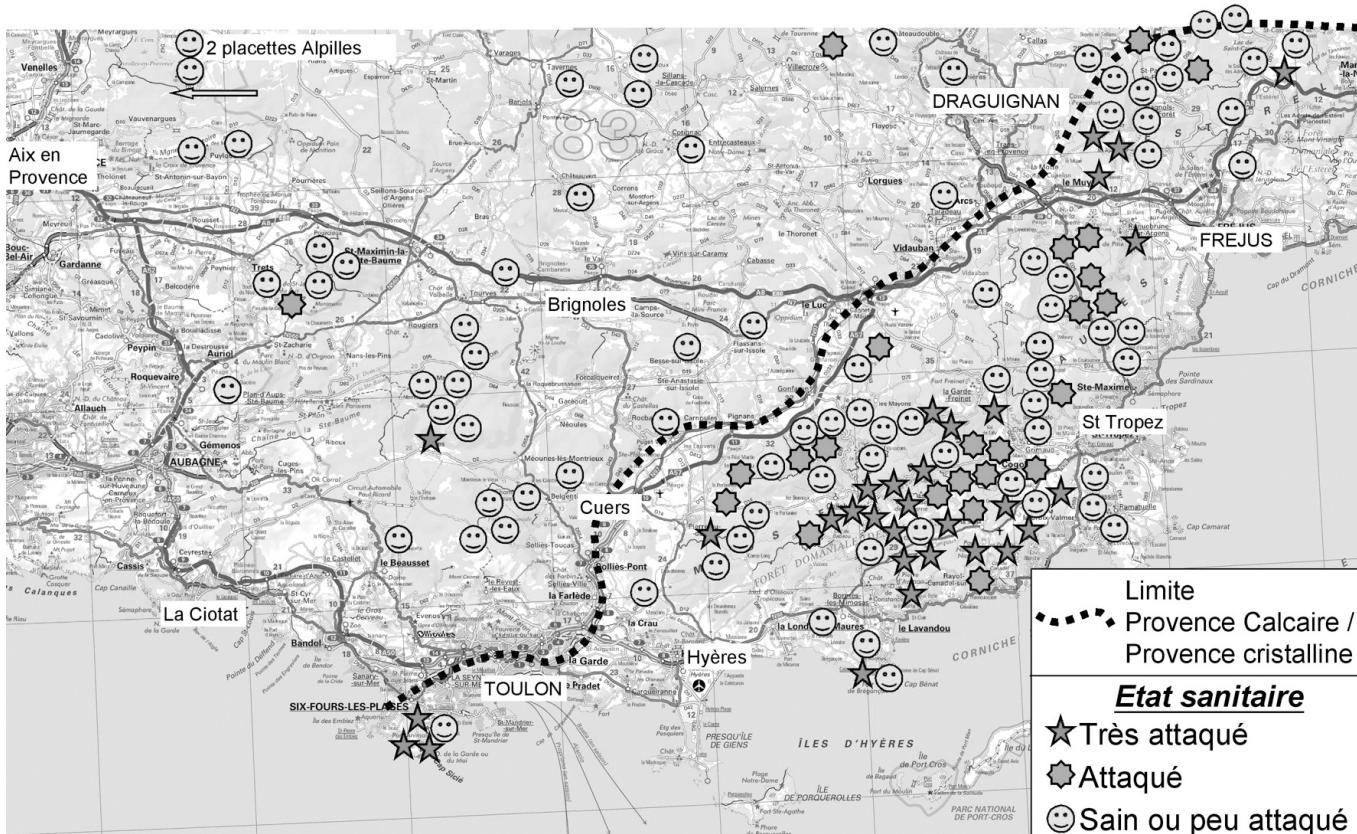
**Fig. 1 :**  
Situation des placettes en Provence calcaire et cristalline

Pour le premier objectif, nous avons recherché les vieux pins maritimes survivants de l'épidémie, et noté le type de station correspondant.

Pour le deuxième objectif, nous avons utilisé deux approches : la recherche d'anciennes placettes, et la recherche de peuplements sains.

Pendant la réalisation du catalogue de stations forestières de la Provence cristalline, près de 500 placettes avaient été installées en 1994 dans les massifs forestiers. Parmi ces placettes, une centaine avait fait l'objet d'observations de l'état sanitaire du pin maritime, suivant un protocole du Département Santé des forêts. Nous avons pu retrouver 89 de ces placettes, et noter arbre par arbre l'état sanitaire en 1998, en le comparant à l'état sanitaire noté 4 ans auparavant. Toutes les placettes ne se prêtaient pas à une comparaison fiable, en raison soit du faible nombre d'individus (5 ou moins), soit de la disparition de certains arbres dont la mort ne pouvait être attribuée de façon certaine à la maladie plutôt qu'à d'autres causes.

Pour compléter les observations, nous avons donc recherché dans les Maures, sur le Cap Sicié, mais aussi dans la dépression permienne périphérique des Maures et dans l'Estérel voisin, des peuplements présentant une absence ou un faible taux d'attaques par



la cochenille et installé soixante placettes supplémentaires. La principale difficulté a été de trouver des peuplements de pin maritime dans le secteur ouest. Les incendies répétés de ces dernières décennies ont fait presque entièrement disparaître le pin maritime de ce secteur, qui ne subsiste, lorsqu'on en trouve, qu'à l'état de très jeunes peuplements, d'individus isolés, et d'une mince frange à l'extrême ouest. La part respective des feux et de la maladie dans cette raréfaction du pin dans le secteur ouest est impossible à chiffrer, bien que l'influence des feux soit probablement prédominante.

Devant l'absence de peuplements vraiment sains en zone cristalline, nous avons étendu nos recherches à la Provence calcaire, où le pin maritime présente de nombreux peuplements âgés, ayant échappé à l'épidémie. Ces peuplements se trouvent soit sur des roches particulières avec peu de calcaire actif (grès, dolomies, sables...), soit sur des substrats calcaires avec des sols partiellement décarbonatés, soit aussi sur des sols à calcaire actif (altérites de calcaire dur ou de calcaire marneux, colluvions calcaires, mais aussi marnes). Quarante-deux placettes ont été réalisées dans toute la Provence calcaire, en recherchant une bonne répartition géographique et une bonne représentativité des peuplements de pin maritime hors zone acide.

C'est donc un échantillon total de 145 sites qui ont été retenus, représenté sur la carte en figure 1.

La notation de l'état sanitaire sur l'ensemble des peuplements a été réalisé entre avril et juin 1998, en majorité au mois de mai, période où la plupart des rameaux secs, symptômes caractéristiques des attaques de *Matsucoccus*, sont bien visibles sur les arbres.

### Méthode de notation

L'état sanitaire du pin maritime peut être noté à partir de plusieurs critères, résultant directement ou secondairement des attaques de la cochenille :

- les exsudations fines de résines au niveau des crevasses de l'écorce, traduisant une colonisation par la cochenille ;
- le dessèchement et la chute de rameaux, traduisant la colonisation du houppier par le parasite, et généralement un stade avancé de l'infestation,



– l'apparition, en plus des symptômes ci-dessus, de coulées importantes et épaisses de résine (appelées pralines), traduisant l'invasion de l'arbre par des parasites de faiblesse, notamment la pyrale du tronc.

On note que les attaques de xylophages (pyrale) ou de sous-corticaux (hylésine, sténographe, piassode...) peuvent se produire en absence de cochenille, et que la présence de ces parasites de faiblesse seuls n'entraîne pas forcément la mortalité à court terme des arbres. C'est l'association cochenille + sous-corticaux qui est généralement fatale.

Le symptôme principal (jaunissement et chute de jeunes rameaux) présente des niveaux d'intensité variés, ce qui conduit à considérer habituellement plusieurs classes :

- *sain* = arbre sain ;
- *jaune* = arbre présentant des rameaux dépérissants isolés, dispersés, conservant un houppier à dominance verte ;
- *jaune plus* = arbre présentant de nombreux rameaux dépérissants (>20%), donnant un houppier globalement jaune repérable de loin.

Le stade ultérieur est le dépérissement de l'arbre sous l'effet des parasites de faiblesse, qui est généralement brutal.

Un nombre important d'arbres ne présente que des signes très discrets de la maladie, notamment en zone calcaire. Une observation rapprochée minutieuse du houppier est indispensable pour déceler les rares rameaux jaunissants. Il nous paraissait important de différencier ces arbres de ceux qui, sans passer dans la catégorie "Jaune plus", présentaient des signes visibles et sans ambiguïté d'atteinte forte du houppier.

### Photo 1 :

Les coulées importantes et épaisses de résine, appelées "pralines" sont dues, non pas à la cochenille, mais à la pyrale du tronc, parasite secondaire.  
Photo D. Afxantidis

Houppier	Symptômes	Code	Grilles de notation			
			A	B	C	D
sain = <b>s</b>	Sans résine	s	10	10	10	10
sain	Pralines de résines = <b>p</b>	sp	8	8	10	10
sain	Ecoulements fins de résine = <b>r</b>	sr	8	5	10	10
sain	Ecoulements fins + Pralines = <b>rp</b>	srp	7	4	10	10
jaune- = <b>j-</b>	Sans résine	j-	8	8	7.5	5
jaune-	Pralines de résines = <b>p</b>	j-p	7	7	7.5	5
jaune-	Ecoulements fins de résine = <b>r</b>	j-r	6	4	7.5	5
jaune-	Ecoulements fins + Pralines = <b>rp</b>	j-rp	5	3	7.5	5
jaune = <b>j</b>	Sans résine	j	5	5	2.5	2.5
jaune	Pralines de résines = <b>p</b>	jp	4	4	2.5	2.5
jaune	Ecoulements fins de résine = <b>r</b>	jr	4	3	2.5	2.5
jaune	Ecoulements fins + Pralines = <b>rp</b>	jrp	3	2	2.5	2.5
jaune+ = <b>j+</b>	Sans résine	j+	3	2	0	0
jaune+	Pralines de résines = <b>p</b>	j+p	2	2	0	0
jaune+	Ecoulements fins de résine = <b>r</b>	j+r	2	1	0	0
jaune+	Ecoulements fins + Pralines = <b>rp</b>	j+rp	1	0	0	0

**Tab. I :**  
Grille d'évaluation  
des symptômes  
de déprérissement :  
quatre grilles de notation  
ont été élaborées,  
définissant quatre indices  
d'état sanitaire  
notés A, B, C, et D.

Nous avons donc créé une classe intermédiaire nommée "jaune moins".

En croisant les divers symptômes, nous avons construit la grille d'évaluation sanitaire (Cf. Tab. I). Il fallait ensuite attribuer une "note" à chacune des classes de symptôme créées. Quatre notations ont été élaborées. Elles vont toutes de 10 pour un arbre parfaitement sain sans aucun symptôme, à 1 ou 0 pour un arbre au stade avancé de déprérissement. Le jaunissement et la chute des rameaux étant considérés dans la littérature comme le signe d'une infestation avancée, nous avons choisi ce critère comme entrée. Les exsudations fines de résine sur l'écorce sont parfois difficiles à observer, et les gros écoulements de résines (pralines) dus à la pyrale ou à des insectes sous-corticaux peuvent se produire en l'absence de cochenille. Ils sont considérés comme signes complémentaires.

Les deux premières grilles tiennent compte de l'ensemble des symptômes : une note de base traduisant l'état du houppier

est modulée en fonction des écoulements de résines sur le tronc et les branches, considérés comme signe de facteurs aggravants : prolifération importante des cochenilles sur le tronc et présence ou abondance des xylophages. Entre ces deux grilles de notation (A et B), la différence vient de l'importance plus grande attribuée aux facteurs secondaires dans la deuxième, notamment aux écoulements fins de résine qui traduisent sans ambiguïté la présence de cochenille.

Les deux autres grilles (C et D) ne prennent en compte que l'état du houppier, conformément aux grilles d'observations habituelles du Département Santé des forêts et aux études précédentes. La différence entre elles vient de l'importance relative donnée au stade jaune moins (j-), considéré comme niveau bénin dans la grille C, mais déjà symptôme sérieux dans la grille D.

Par la suite, la pertinence de ces quatre indices a été systématiquement testée dans les relations avec les stations et les variables du milieu.

## Rappel sommaire des types stationnels

Le massif des Maures a été divisé en trois zones climatiques (LADIER et RIPERT, 1996) :

– le secteur sud-ouest (codé O) est côtier, avec des vallées ouvertes vers l'ouest, soumises aux influences de la Provence occidentale. C'est la partie la plus chaude et la plus sèche des Maures ;

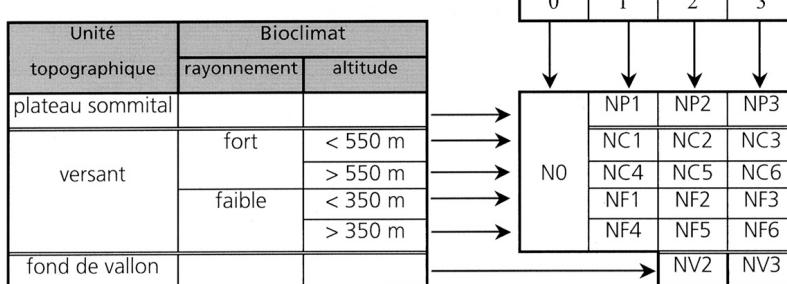
– le secteur sud-est (codé E) est également côtier, mais avec des vallées ouvertes vers l'est et le sud, plus influencées par le climat de la Côte d'Azur, chaud et plus humide. Une étroite frange littorale pourrait former un sous-secteur plus sec, mais la forêt n'y tient qu'un rôle très secondaire par rapport à l'urbanisation et au tourisme, si bien qu'il n'a pas été utile de l'individualiser ;

– le secteur nord (codé N) comprend tout le grand versant nord du massif ainsi que le cœur du massif, ses crêtes et plateaux intérieurs.

A l'intérieur de ces secteurs climatiques, les stations sont définies (Cf. Fig. 2) à partir :

– de la topographie et l'exposition : vallons (V), plateaux (P) versants chauds (C) et versants frais (F),

– du bilan hydrique stationnel, en trois classes : défavorable, moyenne, favorable, notées de 1 à 3 dans les secteurs ouest et est,



et en secteur nord de 1 à 3 ou de 4 à 6 en fonction de l'altitude.

Ainsi une station codée NF3 correspond à une situation en secteur nord, en versant frais, à bilan hydrique favorable, en dessous de 350 m d'altitude.

## Résultats

Les cartes d'arbres survivants dont nous disposions au début de l'étude ne concernaient, dans la zone du catalogue des stations forestières, que quelques arbres isolés ou des petits bouquets de quelques arbres (maxi 3), au milieu de peuplements par ailleurs décimés par la maladie. **Ceci exclut que la résistance individuelle de ces arbres puisse être stationnelle.** Les peuplements résistants se situent en fait hors de la Provence cristalline, la plupart sur des substrats partiellement ou fortement carbonatés.

La recherche dans les Maures de peuplements significatifs sains (au moins quelques ares et quelques dizaines d'arbres âgés) a été vaine. Cette situation élimine de fait l'hypothèse d'une possible bonne résistance liée à la station.

## Reprise des placettes anciennes

En 1994/95, les arbres avaient été notés avec le protocole du Département Santé des forêts : il n'y avait que deux classes dans les arbres touchés notés "jaune" (j et j+). En 98 on avait trois classes (j-, j et j+), par partition de la classe j. On peut faire, en 1998, le regroupement des classes j- et j pour être homogène avec 94/95. On constate alors qu'en 1998, le nombre d'arbres malades est beaucoup plus élevé qu'en 1994/95.

Si on suppose que les arbres fortement touchés n'ont pas pu passer inaperçus en 1994/95 (ils avaient été notés j ou j+), on peut comparer en proportion les arbres de mêmes classes en 1998. A situation sanitaire égale, le nombre de 1994/95 ne pourrait être que supérieur ou égal à celui de 1998, puisqu'il comprend une partie de la classe supplémentaire (j-) dont on ignore la proportion visible. Or ce nombre est nettement supérieur en 98 (Cf. Tab. II). La différence indique le nombre d'arbres qui auraient basculé d'une classe vers le bas, de s, sp, ou j- vers j ou j+. Il est difficile de comparer les

1994				1998			
Sain (ou j- non décelé)		Malade		Sain		Atteint	Malade
s	sp	j	j+	s	sp	j-	j+
29,5	63,8	4,7	2,0	15,6	19,5	37,0	19,5
93,3		6,7		35,1		37,0	27,9

arbres totalement sains, car ceux de 1994/95 peuvent contenir une proportion de j-. Le tableau II fait le point de l'évolution sanitaire des arbres pour les placettes anciennes.

On aurait donc un minimum de 25% d'arbres dont l'état sanitaire se serait aggravé dans les 3 ans séparant les deux inventaires. On note que 3% des arbres ont disparu en l'absence d'exploitation (arbres morts) entre les deux inventaires, sans que la cause de cette mort soit connue avec certitude.

**Tab. II :**  
Evolution (en %)  
de l'état sanitaire  
des pins maritimes  
entre 1994/95 et 1998.

**Photo 2 :**  
Jeune pin maritime  
éclairci par la canicule  
de 2003, mais ne  
présentant aucun  
symptôme  
du *Matsucoccus*  
Photo M. Vennetier



## Relations entre facteurs stationnels et état sanitaire en Provence cristalline

### Relations stations – état sanitaire

L'absence totale de peuplement adulte sain, de taille significative, dans la zone cristalline continentale (Maures, Tanneron, Estérel, dépression permienne, cap Sicié), ainsi que la disparition de toutes les plaquettes anciennes de suivi de la maladie, y compris des placettes qui avaient montré initialement des signes de résistance (CARLE, 74), incite à penser qu'il n'existe pas dans les Maures de conditions stationnelles totalement "immunisantes" contre la maladie.

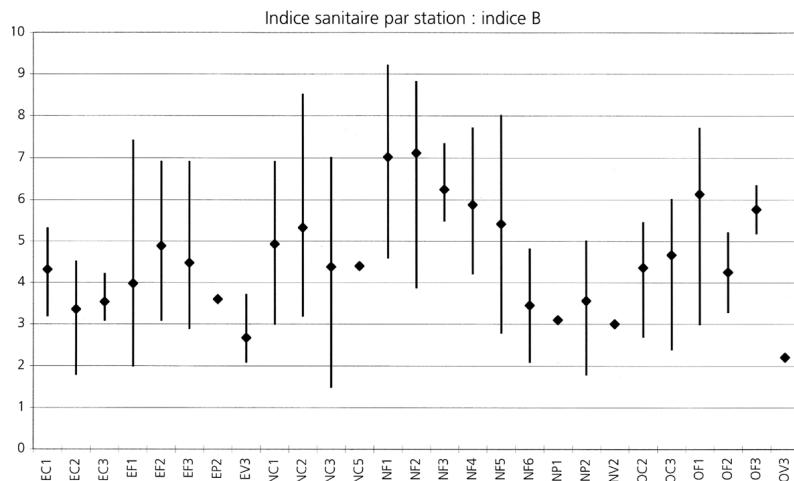
Cette hypothèse est confirmée par notre réseau d'observation, qui montre qu'on trouve des peuplements malades dans tous les types stationnels définis par la typologie des stations forestières et dans toute l'étendue du domaine prospecté.

Quelques rares arbres âgés sains peuvent être trouvés sur les îles d'Hyères (Porquerolles notamment) mais en tout petit nombre, et donc sans qu'on puisse en tirer de conclusion.

Certaines stations semblent cependant moins atteintes en moyenne que d'autres (Cf. Fig. 3), notamment les stations en exposition nord à altitude basse ou moyenne dans les parties nord, nord-est et ouest du Massif des Maures : stations NF1, NF2, NF3, NF4, NF5, OF1, OF3. Mais cette tendance est modérée par des stations fraîches plus fortement touchées comme NF6 ou OF2, qui obligent à être prudent dans son interprétation.

Fig. 3 :

Relation entre type stationnel et état sanitaire. Les lignes verticales indiquent la plage maximale des valeurs notées.



Pour s'affranchir du petit nombre de plaquettes par type stationnel, qui peut expliquer statistiquement ces variations forte d'indice d'attaque au sein d'une zone, nous avons regroupé les stations par exposition/topographie (frais = F ; chaud = C ; neutre = vallons + plateaux = V+P) et par secteur climatique (nord, est, ouest).

La figure 4 montre pour les trois ensembles (F, C, V+P) le pourcentage de plaquettes par classe d'attaque. Les versants frais confirment leur meilleur état sanitaire. La comparaison des moyennes des trois ensembles par un test des rangs de Kruskall-Wallis confirme la validité statistique des différences observées ( $P<0.05$ ).

Les tests statistiques montrent une différence significative au seuil de 5% pour les indices A et B, les indices C et D n'étant pas significatifs à ce seuil mais de très peu ( $p = 6\%$ ). Ces différences montrent l'intérêt du nouveau protocole de notation de l'état sanitaire, plus discriminant. Bien que statistiquement fiable, ces résultats sont à prendre avec précautions en raison de la forte variabilité du phénomène.

Le groupe neutre comprend les vallons et les plateaux, les vallons possédant une moyenne d'indice sanitaire légèrement inférieure aux plateaux. On a recherché si la courbe bimodale n'était pas l'expression du regroupement de ces deux situations très contrastées, mais les différences entre elles ne sont pas significatives.

### Relations variables du milieu – état sanitaire

Nous avons cherché si l'on retrouvait au niveau des variables prises individuellement les tendances trouvées dans les stations, notamment le meilleur état des situations fraîches. Nous avons considéré les variables disponibles couvrant les principaux facteurs de variation du milieu : distance à la mer, topographie et ses effets induits, sol, altitude. Nous ne disposions pas de données fiables pour la pluie et la température sur l'ensemble du massif. Ces deux variables étant fortement corrélées à l'altitude et aux gradients géographiques pris en compte par les autres variables, nous n'avons pas cherché à extrapoler les données des stations météo périphériques du massif, avec les risques que cela comportait.

La distance à la mer a été évaluée par rapport à la zone côtière d'où sont supposées venir les influences maritimes. Cette option permet de tenir compte des reliefs parfois très abrupts et élevés qui font écran aux influences maritimes par rapport au point de côte le plus proche.

### Résultats par variable

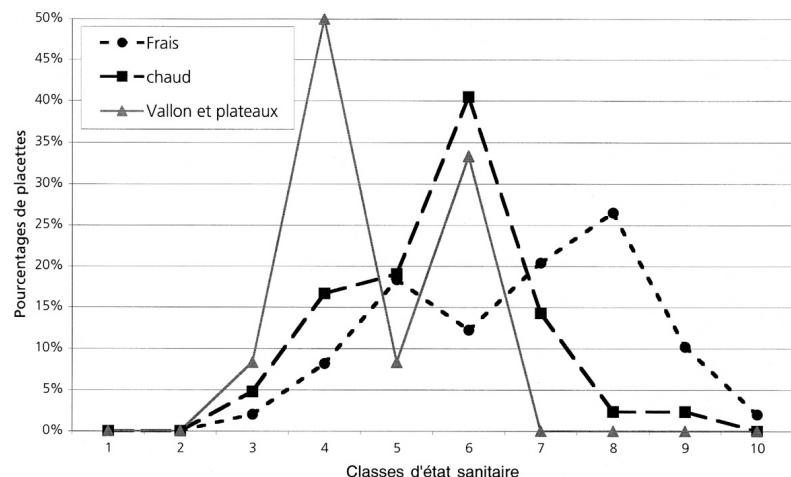
Seules deux variables sont statistiquement corrélées individuellement avec l'état sanitaire du pin, sans que cette relation soit forte ( $r^2 < 0.2$ ) : la distance à la mer, et l'exposition ou l'indice de climat lumineux (IKR) Cf. Fig. 4, combinant exposition et pente (BECKERT, 1984). Une corrélation peut être décelée aussi avec la topographie générale.

Nous avons cherché ensuite s'il pouvait exister des variables dont l'action serait cachée par une interaction avec les autres. Pour cela, nous avons utilisé une analyse en arbre de régression (logiciel S+). Cette méthode permet de voir le rôle que jouent les variables dans des sous-ensembles particuliers de l'échantillon, alors que ce rôle est noyé dans l'ensemble des observations.

Cette analyse met en évidence à la fois la dualité Provence calcaire / Provence cristalline (ou le rôle de la distance à la mer qui recoupe en grande partie cette dualité) comme premier facteur de différenciation, puis au sein de l'ensemble acide l'IKR et l'altitude comme facteurs principaux.

La profondeur de sol intervient également dans le groupe des expositions chaudes et neutres, le dépérissement étant nettement plus prononcé sur les sols profonds. Ce résultat est en contradiction avec la bibliographie et nous ne pouvons pas l'expliquer a priori. Lorsqu'on recherche les placettes correspondantes, on s'aperçoit qu'elles sont pratiquement toutes dans des situations topographiques très favorables, ce qui est logique, puisque c'est là que s'accumulent les matériaux : fonds de vallons, vallées, bas de versants, replats en milieu de versants. Nous avons donc cherché s'il était possible d'établir une correspondance entre topographie générale et état sanitaire, et à partir de là une correspondance avec une des variables déjà citées notamment l'altitude.

Enfin la dualité secteurs sud-est (E) et sud-ouest (O) opposés au secteur nord (N) est une traduction de la distance à la mer et de la continentalité.



**Fig. 4 :**  
Pourcentage de placettes par note d'indice A pour les trois classes d'exposition

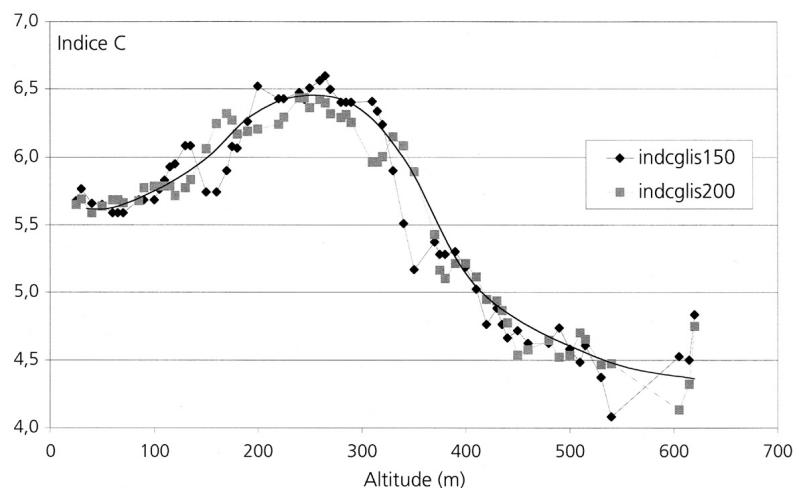
### Altitude

Une analyse en moyenne glissante fait apparaître une relation polynomiale entre altitude et indices (Cf. Fig. 5). Un pic favorable est observé entre 150 et 350 m d'altitude.

Les moyennes des indices des tranches d'altitudes 200-300 m et respectivement 0-100 m et 400-700 m sont différentes au seuil de 5%. Cependant, la très forte variabilité au sein des groupes oblige à être prudent sur la réalité de ces variations altitudinales. Cette prudence est d'autant plus nécessaire qu'aucune tranche d'altitude n'a été épargnée par les déperissements sur le long terme. Ce qui signifie que le déperissement ne serait que ralenti à altitude moyenne.

Pour intégrer l'altitude dans une combinaison de variables, nous l'avons symétrisée par rapport à la valeur donnant l'optimum des

**Fig. 5 :**  
Relation entre altitude et moyenne glissante de l'indice sanitaire C du pin maritime.



indices : 250 m. L'altitude symétrisée (altsym) est en fait la différence en valeur absolue entre l'altitude de la placette et 250 m (la formule de transformation est : si altitude > 250, altsym = altitude - 250 ; si altitude < 250, altsym = 250 - altitude).

### Topographie générale

La topographie générale comporte au départ neuf classes, dont les effectifs sont trop inégaux et pour certains insuffisants pour permettre une analyse statistique fiable. Nous les avons donc regroupés en fonction du bilan hydrique, qui correspond aussi de façon logique à la profondeur moyenne des sols, avec laquelle nous voulions faire un parallèle.

*La classe 1* regroupe les croupes, sommets et hauts de versants convexes : situations défavorables car drainantes, avec des sols majoritairement peu profonds.

*La classe 2* comprend plateaux et versants réguliers : situations intermédiaires dites "neutres".

*La classe 3* comprend fonds de vallons, vallées, bas de versants concaves et replats en milieu de versants : situations favorables pour le bilan hydrique, favorisant aussi l'accumulation de colluvions et alluvions donc des sols profonds.

Il y a une petite différence entre les trois classes de la topographie générale pour la Provence cristalline dans son ensemble, l'indice sanitaire étant d'autant plus faible que la situation topographique, et avec elle la profondeur moyenne des sols, est favo-

rable pour la fertilité et le bilan hydrique. Cette différence est significative au seuil de 5% pour l'indice D, mais pas pour les autres qui sont cependant très proches de la limite : 6% pour les indices A et B, 7% pour l'indice C.

### Combinaisons de variables

Les relations entre variables du milieu et indices étant faibles prises individuellement, nous avons cherché si des combinaisons de variables pouvaient être plus probantes. Pour cela, nous avons testé deux approches :

– l'analyse de données multidimensionnelles, ACP et ACM, dont les axes principaux, peuvent révéler des relations avec les indices sanitaires en absence de relations franches des variables individuelles. Ces analyses ne font que confirmer les relations déjà établies sans apporter d'information supplémentaire,

– des régressions linéaires multiples.

Nous n'avons retenu au départ que les trois variables qui étaient le mieux corrélées individuellement, et pour lesquelles le coefficient de la régression linéaire n'était pas loin de celui de la corrélation maximale obtenue par régression polynomiale. Distance à la mer (Dm), indice de climat lumineux (IKR) et altitude symétrisée (Altsym). Ces trois variables ne présentent aucune corrélation entre elles ( $r^2 < 0,04$ ).

Quelle que soit la méthode utilisée, le coefficient de corrélation ( $r^2$ ) de l'indice sanitaire avec une combinaison de ces trois variables ne dépasse pas 0,36. Même si cette régression est très significative ( $p < 0,001$ ), elle ne permet pas de prédire de façon fiable l'état sanitaire des peuplements, notamment pour les valeurs fortes et faibles de l'indice sanitaire.

Dans cette combinaison de variables, l'altitude symétrisée joue un rôle faible. C'est l'IKR qui pèse le plus dans le modèle, suivi de la distance à la mer.

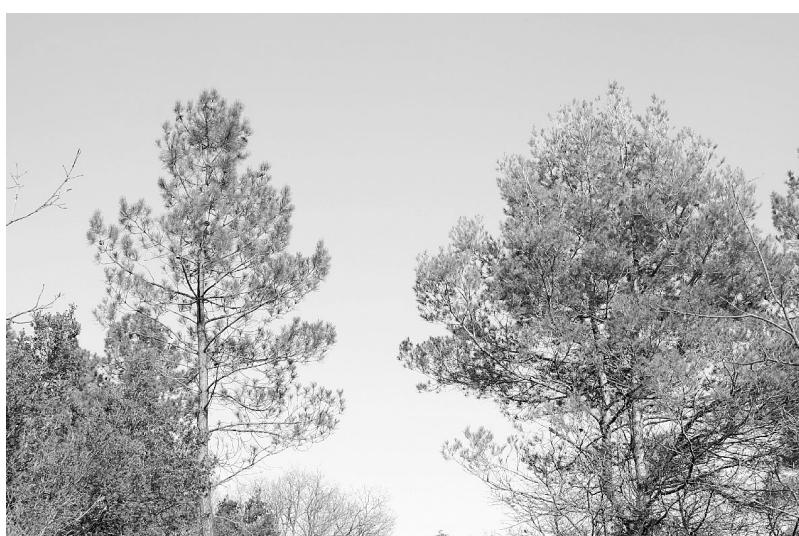
### Conclusion sur les relations indices/milieu en Provence cristalline

La comparaison des quatre indices montre que l'indice B est le plus discriminant pour une majorité des variables et des combinaisons de variables. L'indice C qui servait de

#### Photo 3 :

En Provence, même sur des sols présentant du calcaire actif, le pin maritime (à gauche) fait parfois jeu égal en croissance avec le pin d'Alep (à droite)

Photo M.V.



référence jusqu'à présent est nettement moins performant, ce qui ne signifie pas qu'il ne soit pas bon dans son rôle principal d'évaluation de l'état sanitaire. Une évaluation plus poussée de chaque indice serait nécessaire pour valider la pertinence des informations qu'il porte par rapport à l'évolution sur plusieurs années des symptômes de déprérissement.

Même si des relations statistiquement fiables ont pu être établies entre quelques variables de milieu et les indices sanitaires, notamment en associant les trois variables les mieux corrélées dans une régression multiple, ces relations ne sont jamais assez fortes pour avoir des implications pratiques : la variabilité des indices pour un niveau donné du modèle est toujours très forte, ce qui signifie qu'aucune combinaison de variables ne permet aux pins d'échapper suffisamment à la cochenille pour survivre à long terme en Provence cristalline.

### **Relations entre facteurs stationnels et état sanitaire en Provence calcaire**

Pour la Provence calcaire, nous disposons, en plus des variables utilisées pour la Provence cristalline, de variables climatiques fiables pour une majorité des placettes : les stations météo étant bien réparties sur l'ensemble du territoire, l'absence de reliefs marqués entre les stations météo et nos placettes permettent certaines extrapolations.

De même, le protocole des relevés de placettes sur la Provence calcaire prévoyait une description fine des peuplements et de leur structure. Nous avons donc aussi cherché s'il pouvait y avoir une relation entre l'état sanitaire et la structure du peuplement, exprimée par diverses variables représentatives de la densité de végétation dans les différentes strates prises une à une, deux à deux ou ensemble. L'idée était que la dissémination de la cochenille se fait de façon passive par le vent. Une végétation dense d'autres espèces que le pin maritime au niveau de la canopée et/ou du sous bois peut faire écran à cette dissémination. Nous n'avions pas d'éléments suffisamment précis pour faire les mêmes tests en Provence cristalline.

Mais il n'existe en fait, en Provence calcaire, aucune relation décelable, ni statistiquement, ni simplement visuellement, entre

les variables du milieu ou les variables climatiques ou la structure du peuplement, et l'état sanitaire du pin maritime.

Cette absence est en partie due à la faible variabilité des indices dans la zone calcaire, qui laisse peu de chance de voir des relations si elles ne sont pas très fortes. En fait, une seule placette en Provence calcaire a un indice très faible, traduisant un début de déprérissement généralisé, mais elle n'est pas représentative des peuplements environnants, qui étaient parfaitement sains ou très peu atteints. Elle n'a été prise que pour montrer la possibilité de symptômes marqués en zone calcaire, malgré la rareté du phénomène. D'un point de vue écologique et climatique, cette placette dépréissante n'est pas très éloignée de la Provence cristalline.

En Provence, on n'observe donc pas actuellement de déprérissement avancé lié au *Matsucoccus* hors de la zone cristalline et de ses abords immédiats. Le bon état sanitaire de ces pins maritimes est attesté par la présence de nombreux peuplements, bouquets et arbres isolés âgés de plus de 50 ans, et ayant donc résisté depuis le début de l'épidémie.

### **Comparaison entre Provence cristalline et Provence calcaire**

#### **Comparaison globale**

Il existe une différence marquée entre Provence calcaire et Provence cristalline illustrée par la différence des moyennes des quatre indices sanitaires (Cf. Tab. III). Ces différences sont toutes hautement significatives ( $p < 0.01$ ).

Il est cependant difficile d'attribuer cette nette supériorité de la Provence calcaire à la différence de roche mère car Provence calcaire et Provence cristalline diffèrent considérablement sur le plan climatique. Le tableau III montre que la distance à la mer et le "masque" (c'est-à-dire la hauteur moyenne des reliefs qui séparent le relevé et

**Tab. III :**  
Comparaison entre Provence cristalline et calcaire

	Dist. mer	Masque	ind A	ind B	ind C	ind D
Cristalline	10.9	265.9	5.6	4.8	5.6	4.6
Calcaire	30.8	576.9	7.3	7.0	7.2	5.4

la mer) sont nettement supérieurs pour les relevés de la Provence calcaire, induisant une plus forte continentalité.

Cela est lié :

- au fait qu'en Provence calcaire, on ne trouve quasiment pas de pin maritime à proximité de la mer, dans les zones dominées par le pin d'Alep ;

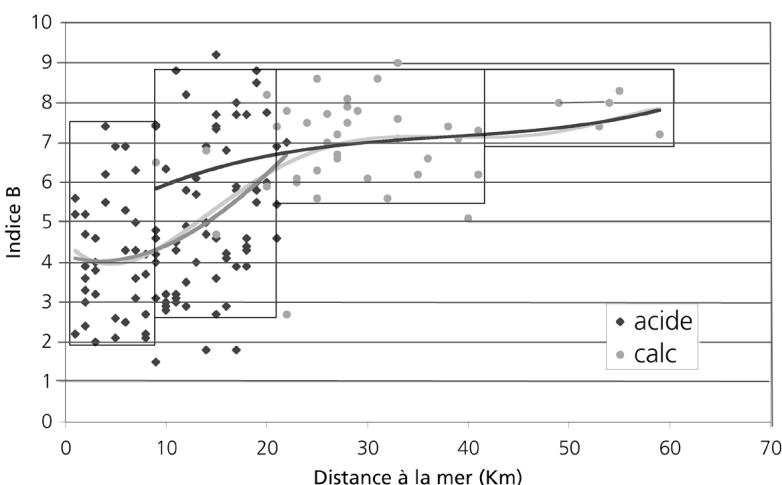
- à la présence de roches cristallines exclusivement dans la zone côtière et dans un secteur géographique bien délimité : Maures, Estérel, cap Sicié et îles d'Hyères.

La figure 6 montre que la différence entre zone calcaire et zone cristalline n'est pas significative dans la plage de distances à la mer commune aux deux ensembles.

Il est prudent de considérer que nos données sont trop peu nombreuses pour permettre de différencier zones acides et zones calcaires dans leur partie commune vis à vis de la distance à la mer. On ne peut donc pas affirmer sur ces bases que la présence de substrat calcaire, plutôt qu'une différence climatique, est la cause principale des différences observées entre les deux ensembles.

Pour affiner l'analyse, nous avons reporté dans un climagramme d'Emberger toutes les stations météo de la zone d'étude sur lesquelles pluies et températures sont simultanément disponibles (Cf. Fig. 7) : on voit alors clairement se différencier la Provence cristalline et la Provence calcaire. La ligne de démarcation des dépérissements systématiques passe à peu près entre les deux ensembles.

**Fig. 6 :**  
Relation entre état sanitaire du pin maritime et distance à la mer en fonction du substrat (acide/calcaire)



Dans la zone de jonction entre les deux sous-ensembles bioclimatiques, il existe des similitudes climatiques, notamment entre l'est du massif de la Sainte-Baume et du massif de Signes (station de Méounes) et l'ouest de la Provence cristalline (station de Collobrières). Malgré cette ressemblance, les peuplements âgés de pin maritime ont tous dépéri dans les années 60-80 dans la zone de Collobrières et les régénérations sont fortement touchées actuellement, alors qu'ils sont pratiquement tous sains dans le massif de Signes. De même, il y a imbrication climatique de la dépression permienne qui ceinture les Maures, et où des dépérissements sont observés, avec le Var calcaire où les peuplements sont majoritairement sains.

Ce climagramme ne permet cependant qu'une typologie grossière des climats de la zone d'étude sur la base des températures et de la pluie annuelle. C'est insuffisant pour résoudre les questions qui se posent aux limites entre les deux sous-ensembles.

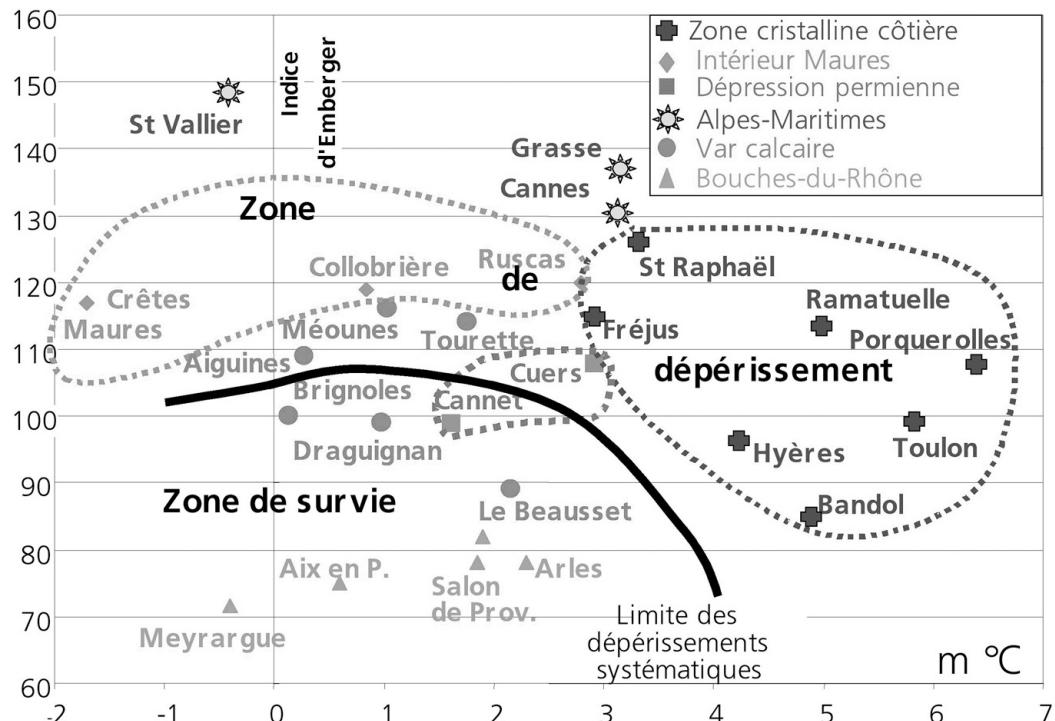
En l'absence d'étude poussée, à l'échelle locale de la Provence, sur les relations entre les variables climatiques détaillées et l'état sanitaire, en raison du nombre limité de placettes en Provence calcaire et du manque d'exhaustivité de ces placettes par rapport aux peuplements existants hors zone acide, il est impossible de séparer le rôle du climat et du substrat dans la résistance du pin maritime au *Matsucoccus*.

## Discussion

### Comparaison avec les résultats antérieurs

Les résultats que nous obtenons ne peuvent pas être comparés à ceux des études menées pour la plupart dans les années 60 et 70. Le parasite était alors en phase épidémique sur des peuplements adultes de grande surface (CARLE, 1971 ; RIOM, 1994). On se trouve actuellement avec des peuplements jeunes et beaucoup plus dispersés.

Le facteur le plus souvent cité parmi ceux qui pouvaient influencer l'état sanitaire est l'altitude (CHARARAS, sd). Mais les résultats anciens font état d'une meilleure résistance aux altitudes élevées, et recommandent de ne pas miser sur le pin maritime en dessous de 400 m. Ceci est en contradiction avec nos résultats qui montrent que l'état sanitaire



**Fig. 7 :**  
Climagramme d'Emberger montrant la séparation entre Provence calcaire (Bouches-du-Rhône et Var calcaire) et Provence cristalline pour l'aire du pin maritime. L'abscisse correspond à la moyenne des températures minimales journalières du mois le plus froid, l'ordonnée à l'indice d'Emberger.

suit en moyenne une courbe en cloche avec son optimum entre 250 et 300 m, et des minimums en dessous de 150 m et au-dessus de 450 m.

Il est aussi signalé que les pins sont plus déperissants en versant sud sur sols squelettiques. Nous arrivons à la même conclusion sur l'exposition, en montrant que les pins se portent mieux en versant nord, mais par contre la relation entre profondeur de sol et indices est pour nous négative, même si elle est faible. Il peut y avoir une interaction entre profondeur du sol et altitude, puisque la majorité des placettes en sols profonds se trouve dans des vallons et vallées, donc à relativement basse altitude où l'état sanitaire n'est pas bon.

Toutefois, aucune des conclusions des études anciennes ou de celle-ci ne permet de conclure à des conditions de milieu protégeant le pin maritime de façon durable en Provence cristalline sur le long terme : toutes les placettes anciennes ont fini par disparaître, et des placettes déperissantes ont été trouvées au cours de cette étude dans toutes les combinaisons de variables.

### Etudes souhaitables

C'est surtout dans la dualité Provence calcaire / Provence cristalline qu'il serait nécessaire de pousser plus loin l'investigation. En effet, le taux d'échantillonnage de la Provence calcaire est faible, et tous les peuplements de pin maritime de cette zone ne sont pas représentés dans l'échantillon. On ne peut pour l'instant pas conclure définitivement sur les raisons de la survie des pins maritimes en zone calcaire, bien que les variables climatiques et la continentalité soient probablement impliqués dans cette résistance via leur action directe sur le *Matsucoccus* (RIOM et GERBINOT, 1977, RIOM, 1980). Des facteurs liés au pin maritime, d'ordre génétique, phénologique, phénotypique (GUYON, 1980 ; LOISEL, 1967) peuvent être impliqués, de même que des relations entre l'ensemble calcaire et le *Matsucoccus*, via la présence de prédateurs ou super-parasites inféodés aux milieux calcaires et/ou à leur flore.

Il serait intéressant de rechercher les limites entre zones de déperissement et zone de résistance de façon plus exhaustive en



**Photo 4 :**

Peuplement mélangé pied à pied et parfaitement sain de pin maritime et pin d'Alep en Provence calcaire (commune de Pourcieux, Var)  
Photo M.V.

Provence, mais aussi en Corse et au-delà des frontières françaises (FABRE, 1980), et de replacer ces limites sur le climagramme d'Emberger ou d'autres diagrammes climatiques plus précis. La recherche de pin maritime sur sols plus ou moins carbonatés dans un ensemble climatique ressemblant aux Maures permettrait de répondre partiellement à la question, de même que l'introduction dans les Maures de provenances de la Provence calcaire proche. Il semble par contre inutile de chercher plus avant des relations entre milieu et état sanitaire en Provence cristalline. C'est plutôt l'adaptation génétique progressive du pin à son parasite qu'il faut suivre.

## Conclusion

Nous n'avons trouvé que peu de relations entre les stations forestières du catalogue de la Provence cristalline et l'état sanitaire du pin maritime. Seules les stations fraîches en versant nord, principalement dans le cœur et le nord du massif des Maures, semblent se porter mieux que la moyenne. Mais ces relations ne sont pas très fiables en raison de la grande variabilité du phénomène. Le regroupement des stations par niveau de fertilité ou par région bioclimatique à l'intérieur du massif des Maures n'améliore pas le résultat, et aucune tendance ne se dessine quels que soient les autres modes de regroupement testés.

Pour la Provence cristalline, seules trois variables montrent individuellement les signes d'une possible influence sur l'état sanitaire : l'altitude, la distance à la mer et l'exposition. Le pin maritime est moins attaqué en expositions fraîches, entre 150 et 450 m et loin de la côte. Ces trois variables sont d'ordre climatique, témoignant de l'importance du climat pour la virulence du parasite. Si la différence peut être démontrée statistiquement entre certaines classes de ces variables, elle n'est cependant pas assez importante pour avoir des implications pratiques : des peuplements dépérissent significativement plus lentement, mais dépérissent tout de même. En témoignent l'absence totale de vieux peuplements et la disparition de toutes les placettes des anciens réseaux de suivi, dont certaines avaient montré pendant les premières années des signes de résistance partielle.

Pour la Provence calcaire, il n'existe aucune relation entre état sanitaire et milieu, l'ensemble des peuplements étant en bonne santé à de très rares exceptions près, la présence de vieux peuplements attestant de la persistance de cet état depuis le début de l'épidémie.

Si une différence importante et significative peut être notée entre Provence calcaire et Provence cristalline, les raisons de cette différence restent hypothétiques. La Provence cristalline constitue un ensemble bioclimatique spécifique, côtier, et bien différencié des zones calcaires qui l'entourent, où le pin maritime ne s'approche pas de la mer.

La résistance en Provence calcaire ne peut donc être attribuée de façon fiable aux facteurs climatiques plutôt qu'au substrat, aux caractères phénologiques, génétiques ou phénotypiques qui peuvent découler de l'adaptation du pin maritime aux sols carbonatés, ou à d'autres facteurs liés à ces sols.

**M.V., C.R., O.C.**

## Remerciements

Ce travail a été financé par le ministère de l'Agriculture, convention n° 01.40.09/98 avec la DERF

### Bibliographie

- ABGRALL F.F., SOUTRENON A., BARTHOD C. ; 1990. Guide technique du forestier méditerranéen, chapitre 5 : « Protection sanitaire » ; 100 p.
- BECKER M. ; 1984 - Indices de climat lumineux selon la pente et l'exposition pour les latitudes de 40 à 50°. *Bulletin d'Ecologie*, t 15-4, p239-252
- CARLE P. ; 1971. Les phénomènes présidant aux successions d'insectes dans le Var. *Zoologie animale* ; pp.177-192.
- CHARARAS C. Le pin maritime. Dépérissage général dans le Var. Etude du rôle des insectes, des conditions chimiques, des facteurs biologiques. *Encyclopédie entomologique* série A.T.X.L., vol. 1 ; Ed. Lechevallier.
- DUCASSE G. ; 1942. Note sur *Matsucoccus feytaudi*. *Revue forestière d'entomologie*.
- FABRE J.P. ; 1980. Mortalité dans les peuplements de pins maritimes à la suite de l'introduction de *Matsucoccus feytaudi* DUC. en Italie. *Estrato da Italia forestale e montana*, n°1 ; pp.39-42.
- LADIER J., RIPERT C. ; 1996. Les stations forestières de la Provence cristalline. (Cap Sicié, îles d'Hyères, Maures, Tanneron) – Cemagref - Aix en Provence - 92 p + annexes.
- LOISEL R. ; 1967. Phénologie de *Pinus mesogeenesis* (GAUSSEN et FIESCHI) dans le département du Var. *Annales de la faculté de Marseille*, tome 39 ; pp.129-135.
- RIOM J. ; 1980. Biologie et écologie des populations de la cochenille du pin maritime : *Matsucoccus feytaudi*. *Thèse de doctorat en sciences naturelles*, n° 660 université de Bordeaux I ; 253 p.
- RIOM J. ; 1994. Le dépérissement du pin maritime dans le Sud-Est de la France au cours des années 1960-1970. Le rôle de la cochenille *Matsucoccus feytaudi*. *RFF* vol. XLVI, n°5 ; pp. 437-445.
- RIOM J., GERBINOT B. ; 1977. Etude biologique et écologique de la cochenille du pin maritime : *Matsucoccus feytaudi* DUC. (*coccoidea, margarodidae, xylococcinae*) dans le Sud-Est de la France. Biologie générale et phénologie. *ANN. ZOOL. ECOL. ANIM.*, n°9 (1) ; pp.11-50.
- SCHVESTER D. ; 1982. Incidence de *Matsucoccus feytaudi* sur pin maritime de diverses provenances en région méditerranéenne. *Compte rendu des séances de l'Académie d'agriculture de France*, tome 68, n°17 ; pp.1324-1333.
- SCHVESTER D., CARLE P., RIOM J. ; 1970. Le dépérissement du pin maritime dans le Var : état actuel du problème. *RFF* vol. XXII, n° hors série « la lutte biologique en Forêt » ; pp.240-246.
- SCHVESTER D., UGHETTO F. ; 1986. Différences de sensibilité à *Matsucoccus feytaudi* selon les provenances de pin maritime. *Annales des sciences forestières*, vol. 43, n°4, pp. 459-474.
- UGHETTO F. ; 1981. Observation sur l'incidence en région méditerranéenne de *Matsucoccus feytaudi* DUC. 1942 (*coccoidea, margarodidae*) sur pins maritimes de diverses provenances. Mémoire de 3<sup>e</sup> année ENITEF Nogent-sur-Vernisson, INRA Avignon ; 59 p.

### Résumé

---

Cet article présente une étude destinée à vérifier s'il existe une résistance partielle du pin maritime à la cochenille *Matsucoccus feytaudi* (Duc.), induite par les caractéristiques stationnelles.

Sur un réseau d'une centaine de placettes représentatives du massif des Maures, installées en 1994/95 à l'occasion de la typologie des stations forestières, l'état sanitaire du pin maritime avait été noté suivant un protocole du Département Santé des Forêts. Ces placettes ont été revisitées en 1998 : nous avons noté une tendance à l'aggravation des symptômes de dépérissement. Après avoir défini un indice d'état sanitaire, et parcouru l'ensemble du massif, nous avons constaté qu'il n'existe pas en Provence cristalline, en 1998, de peuplements sains de pin maritime. Il y a peu de relations entre types de stations forestières et état sanitaire. Dans les Maures, des peuplements dépérissent plus lentement en exposition nord, entre 150 et 450 m d'altitude et loin de la côte, donc dans des situations assez fraîches et humides, mais dépérissent tout de même à terme.

Nous avons ensuite étendu l'étude à toute la Basse Provence où le pin maritime est disséminé sur des substrats non ou peu calcaires (grès, dolomies, sables, ...), sur des substrats partiellement décarbonatés, mais aussi localement sur des substrats à calcaire actif. Le pin maritime est moins attaqué sur les substrats et sols carbonatés qu'en Provence cristalline, et au-delà de 10 à 15 km de la côte. Mais la limite du pin maritime hors zones cristallines correspond aussi à une limite biogéographique. La résistance en Provence calcaire peut donc être attribuée aussi bien aux facteurs climatiques qu'au substrat, ou à une combinaison des deux types de facteurs, avec peut-être une composante génétique.

Mots clefs : *Pinus pinaster*, *Matsucoccus feytaudi*, dépérissement, stations forestières, Maures, Provence

## Summary

---

Investigation of the connection between forest stands and the health of the maritime pine in Provence (S-E France) in relation to the bast scale *Matsuccoccus feytaudi* (Duc.)

This article presents research designed to verify whether or not partial resistance to the *Matsuccoccus feytaudi* (Duc.) bast scale may result from the characteristics of stand location.

Across a network of around 100 plots, representative of the Maures Mountains and circumscribed in 1994-95 at the time of a typological survey of woodlands, the state of health of the maritime pine was registered on the basis of specification guidelines drawn up by the Forestry Health Division. These plots were reassessed in 1998, at which time we noted a tendency to an increase in the symptoms of decline. After deciding on parameters indicating the state of health, followed by visits to an comprehensive cross-section of stands, in 1998 there were found to be no healthy stands of maritime pine on crystalline soils in Provence. There is little connection between plot location and state of health. In the Maures area, the pines show a slower decline in northern exposures between 150m-450m altitude and far from the coast, that is in fairly cool and damp locations ; but even so, they eventually wither. Subsequently, we expanded our study throughout Lower Provence, where the maritime pine grows on non- or slightly limestone soils (sandstone, dolomites, sand...), on decarbonated land and in some places on calcium carbonate. The maritime pine is less subject to attack on limestone soils or subsoils than in the crystalline areas of Provence and, also, when more than 10-15 km inland from the coast. However, the limit of the maritime pine beyond the crystalline zones corresponds to a bio-geographic limit. The resistance of the species in limestone Provence can thus be attributed as much to climatic features as to the soil, or to a combination of both factors, with a possible genetic element.

Key words : *Pinus pinaster*, *Matsuccoccus feytaudi*, decline, survey of woodlands, Maures, Provence

## Riassunto

---

Ricerca di relazione tra stazioni forestali e stato sanitario del pino marittimo in attinenza colla cocciniglia *Matsuccoccus feytaudi* (Duc.)

Questo articolo presenta uno studio destinato a verificare se esiste una resistenza parziale del pino marittimo alla cocciniglia *Matsuccoccus feytaudi* (Duc.), indotta dalle caratteristiche stazionali.

Su una rete di una centina di posti rappresentativi del massiccio dei Maures, sistemati nel 1994/1995 all'occasione della tipologia delle stazioni forestali, lo stato sanitario del pino marittimo era stato notato secondo un protocollo del Département Santé des Forêts (dipartimento salute delle foreste). Questi posti sono stati visitati di nuovo nel 1998 : abbiamo notato una tendenza all'aggravazione dei sintomi di deperimento. Dopo avere definito un indice di stato sanitario, e percorso un campione esauriente di popolamenti, non abbiamo trovato in Provenza cristallina, nel 1998, popolamenti sani di pino marittimo. Ci sono pocche relazioni tra tipi di stazioni forestali e stato sanitario. Nei Maures, i popolamenti deperiscono più lentamente in esposizione nord, tra 150 e 450 metri di altitudine e lontano dalla costa, dunque in situazioni abbastanza fresche e umide, ma deperimento però a termine.

Abbiamo dopo allargato lo studio all'intera Provenza bassa dove il pino marittimo è disseminato su sostrati non o poco calcarei (arenarie, dolomie, sabbie...), su sostrati parzialmente decarbonatati, ma anche localmente su sostrati a calcareo attivo. Il pino marittimo è meno attaccato su sostrati e suoli carbonatati che in Provenza cristallina, e al di là di 10 a 15 km della costa. Ma il limite del pino marittimo fuori zone cristalline corrisponde anche a un limite biogeografico. La resistenza in Provenza calcarea può dunque essere attribuita tanto ai fattori climatici quanto al sostrato, o a una combinazione dei due tipi di fattori, con forse una componente genetica.

Parole chiavi : *Pinus pinaster*, *Matsuccoccus feytaudi*, deperimento, stazioni forestali, Maures, Provenza.